



Modélisation et évaluation de la performance des terminaux portuaires

Abderaouf Benghalia

► To cite this version:

Abderaouf Benghalia. Modélisation et évaluation de la performance des terminaux portuaires. Modélisation et simulation. Université du Havre, 2015. Français. NNT : 2015LEHA0010 . tel-01255291

HAL Id: tel-01255291

<https://theses.hal.science/tel-01255291>

Submitted on 13 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE Sciences Physiques, Mathématiques et de l'Information pour l'Ingénieur (SPMII)

Laboratoire LMAH

THÈSE présentée par :

Abderaouf BENGHALIA

soutenue publiquement le : **16 Octobre 2015**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université du Havre**

Discipline/ Spécialité : Informatique/ Génie logiciel

MODÉLISATION ET ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES TERMINAUX PORTUAIRES

MEMBRES DU JURY :

Président :

M. Hugues MOLET

Professeur, Mines ParisTech

Rapporteurs :

M. Kokou YETONGNON

M. Djamal BENSLIMANE

Professeur, Université de Bourgogne

Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1

Examineur :

M. Jean-François EMERY

Chargé de mission Recherche et Innovation, GPMH

Directeur de thèse :

M. Jaouad BOUKACHOUR

Maître de conférences HDR, Université du Havre

Co-encadrante de thèse :

Mme. Dalila BOUDEBOUS

Maître de conférences, Université du Havre

Dédicace : à mes chers parents

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Kokou YETONGNON Professeur à l'Université de Bourgogne , et à Monsieur Djamal BENSLIMANE, Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1, d'avoir accepté de rapporter cette thèse et pour leurs remarques qui ont permis d'améliorer la qualité de ce manuscrit.

Toute ma gratitude s'adresse à Monsieur Hugues MOLET, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, d'avoir accepté d'examiner mon travail et présider le jury.

Mes sincères remerciements vont à Monsieur Jean François EMERY, Chargé de mission recherche et innovation au Grand Port Maritime du Havre pour sa collaboration, pour les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir, et pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mes encadreur Monsieur Jaouad BOUKACHOUR, directeur de thèse, Maître de conférences HDR à l'université du Havre et Madame Dalila BOUDEBOUS, co-encadrante de la thèse, Maître de conférences à l'Université du Havre. Je leur témoigne ma gratitude et ma profonde reconnaissance pour leur soutien, leur disponibilité, leurs précieux conseils et leur suivi permanents.

Je tiens également à adresser mes plus vifs remerciements à mes collègues pour leurs collaborations et les bons moments que nous avons passés ensemble dans une ambiance assez chaleureuse.

Je remercie mon père pour les différentes remarques, suggestions et pour son soutien, accompagnement et sacrifices tout au long de mes années d'études. Merci à ma mère pour sa tendresse, son attention et ses encouragements. Je tiens à remercier très chaleureusement mon frère et mes sœurs pour leur soutien moral et l'intérêt qu'ils ont toujours porté à ce que je faisais et qui même à distance n'ont cessé de m'encourager. Je souhaite remercier tout particulièrement ma femme pour sa présence inestimable, ses encouragements et qui a partagé mes doutes et mes joies.

Un grand merci à tous les membres de ma famille, mes amis et une pensée à tous ceux qui me sont chers et qui ne sont plus parmi nous.

Table des matières

Table des matières	4
Liste des tableaux	7
Liste des figures	8
CHAPITRE I : INTRODUCTION GÉNÉRALE	10
CHAPITRE II : LA CHAÎNE LOGISTIQUE PORTUAIRE	15
1. INTRODUCTION.....	17
2. LA CHAÎNE LOGISTIQUE.....	17
2.1. La chaîne logistique portuaire	18
2.2. Les processus de la chaîne logistique portuaire	20
3. LES FLUX DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE.....	20
3.1. Pilotage de flux.....	21
4. GESTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE PORTUAIRE.....	23
5. LES TROIS REVOLUTIONS	24
6. UN TERMINAL À CONTENEURS	26
6.1. Les différentes zones d'un terminal à conteneurs	27
7. LE TRANSPORT MARITIME, LE TRANSPORT MASSIFIÉ ET LA MULTIMODALITE	30
7.1. Transport routier.....	30
7.2. Transport maritime ou fluvial	31
7.3. Transport ferroviaire	31
..... vers un mode multimodal	31
8. CONTEXTE ET TERRAIN D'ÉTUDE : PORT DU HAVRE	33
8.1. Le terminal Multimodal du Havre.....	34
8.2. Les projets ESSIMAS et DCAS.....	37
8.3. Objectifs	38
9. CONCLUSION	39
CHAPITRE III : PROBLÈMES PORTUAIRES ET APPROCHES DE RÉOLUTION	41
1. INTRODUCTION.....	43
2. PROBLÈMES PORTUAIRES.....	43
2.1. Problèmes liés à la zone à quai.....	46
2.1.1 Allocation des postes à quai	46
2.1.2 Arrimage de conteneurs	48
2.1.3. Ordonnancement des grues de quais	48

2.2. Problèmes liés à la cour.....	49
2.2.1. Ordonnancement des grues de la zone de stockage	49
2.2.2. Problème de Stockage de Conteneurs	50
2.2.3. Ordonnancement des véhicules de transfert interne des conteneurs	50
3. APPROCHES DE RÉOLUTION	51
3.1. Optimisation mathématique	51
3.2. Simulation	53
3.2.1. La simulation à événements discrets et simulation continue	55
3.2.2. La simulation Multi Agent	56
3.3. Choix de l'approche de résolution	57
4. CONCLUSION	59
CHAPITRE IV : ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ET CONTRIBUTION...	60
1. INTRODUCTION.....	62
2. REVUE DE LITTÉRATURE	62
2.1. La notion de performance	63
2.2. Rôle et importance des indicateurs de performance.....	63
2.3. Mesure de performance	66
2.4. Évaluation de la performance.....	68
3. MÉTHODES POUR LA MESURE ET L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE.....	70
3.1. Triplet efficacité / efficience / pertinence	70
3.2. La méthode ABC/ABM : L'Activity Based Costing et l'Activity Based Management	70
3.3. Le modèle BSC : Balanced ScoreCard	71
3.4. Le modèle SCOR : Supply Chain Operation Reference modele	71
3.5. La méthode ECOGRAI	73
3.5.1. La méthode GRAI (Graphe à Résultats et Activités Inter-reliés)	74
4. NOTRE DÉMARCHE ECOGRAISIM	75
4.1. Limites d'ECOGRAI et contribution.....	78
5. CONCLUSION	79
CHAPITRE V : ECOGRAISIM : MODÉLISATION ET ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU PORT DU HAVRE	81
1. INTRODUCTION.....	83
2. NOTRE CONTRIBUTION D'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE	83
3. ECOGRAISIM POUR LE CAS DU PORT DU HAVRE	86
3.1. Schéma logistique actuel au port du Havre	87
3.2. Schéma logistique futur.....	88

3.3. Grille GRAI pour le nouveau schéma logistique du port du Havre	89
3.4. Objectifs, Variables de décision et Indicateurs de performance	94
3.5. Modélisation UML des activités du nouveau schéma logistique du port du Havre.....	97
3.5.1. Diagramme de cas d'utilisation	98
3.5.2. Diagrammes de classe	101
3.5.3. Objets de gestion et de coordination	105
3.5.4. Diagrammes de séquence	107
4. CONTRIBUTION À L'AMÉLIORATION DE L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE	109
5. CONCLUSION	110
CHAPITRE VI : SIMULATION DE TRANSFERT FERROVIAIRE DE CONTENEURS	112
1. INTRODUCTION.....	114
2. PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE ET ENJEUX	114
3. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE SIMULATION	117
3.1. Présentation de FLEXSIM	117
3.2. Présentation de la bibliothèque Rail API	118
3.3. Implémentation.....	119
4. SCÉNARIOS DE SIMULATION	122
4.1. Modes de transfert Massifié/Planifié.....	123
4.2. Mode de transfert Optimisé.....	127
4.2.1. Résultats numériques du mode optimisé.....	132
5. MODE OPTIMISÉ : PRISE EN COMPTE DE TOUS LES TERMINAUX	138
6. VALIDATION DU MODÈLE.....	144
7. CONCLUSION	145
CHAPITRE VII : CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	147
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	148
Bibliographie.....	150
Résumé.....	161
Abstract	162

Liste des tableaux

Tableau II.1: Comparaison entre les modes de transport	32
Tableau II.2: Trafic du port du Havre	34
Tableau III.1. Classification des travaux sur les terminaux à conteneurs	46
Tableau IV.1. Quelques avantages et limites des méthodes (ABC/ABM, BSC, SCOR, ECOGRAI).....	77
Tableau V.1. Tableau introductif	91
Tableau V.2. Tableau des indicateurs de performance	96
Tableau VI.1. Outils de simulation	117
Tableau VI.2. Rapport d'état pour le mode planifié	124
Tableau VI.3. Rapport d'état pour le mode massifié	126
Tableau VI.4. Résultats de la méthode d'optimisation	133
Tableau VI.5. Récapitulatif de l'analyse des instances	137

Liste des figures

Figure II.1 : Représentation de la communauté portuaire	19
Figure II.2 : Les processus de la chaîne portuaire.....	20
Figure II.3 : Représentation des flux dans la chaîne logistique	21
Figure II.4 : Niveaux de décisions de la chaîne logistique portuaire	22
Figure II.5 : Trafic Mondial de conteneurs	24
Figure II.6 : Exemple d'un terminal à conteneurs	26
Figure II.7 : Différents équipements de transfert de conteneurs dans un terminal à conteneurs	27
Figure II.8 : Les processus d'import et d'export des conteneurs dans un terminal.....	28
Figure II.9 : Les processus dans un terminal à conteneurs.....	29
Figure II.10 : Port du Havre	33
Figure II.11 : Parts modales pour le trafic des conteneurs dans le rang Nord. (2013).....	35
Figure II.12 : Plan du Port du Havre	38
Figure III.1. Exemple : Affectation des navires à des postes à quai d'un terminal à conteneurs	46
Figure III.2. Allocation des postes d'amarrage	47
Figure III.3. Portique de parc	49
Figure III.4. Classification des méthodes d'optimisation	52
Figure III.5. Les étapes nécessaires pour la conduite d'une simulation.....	54
Figure IV.1. Chronologie des principales démarches pour le pilotage par la performance	67
Figure IV.2. Démarche d'évaluation de la performance	69
Figure IV.3. Triangle : Objectif, Moyen, Résultat	70
Figure IV.4. Le modèle SCOR.....	72
Figure IV.5. Grille Grai	75
Figure IV.6. ECOGRAI et ECOGRAISIM.....	78
Figure V.1. Schéma logistique actuel.....	88
Figure V.2. Nouveau schéma logistique	88
Figure V.3. GRAI pour les enjeux du projet du terminal multimodal	92
Figure V.4. GRAI pour l'exploitation du terminal multimodal.....	93
Figure V.5. Diagramme de cas d'utilisation	99
Figure V.6. Les packages du diagramme de classe.....	101
Figure V.7. Diagrammes de classe réalisés.....	103

Figure V.8. Des classes du package Technologie	103
Figure V.9. Extrait du diagramme Inter relation	104
Figure V.10. Prototype du diagramme de classes « Relation externes »	105
Figure V.11. Objets de gestion au niveau du terminal multimodal.....	105
Figure V.12. Objets de gestion au niveau du terminal port 2000.....	106
Figure V.13. Diagramme de séquence « Mission import de TDF vers le terminal multimodal »	109
Figure VI.1. Plan du port du Havre	115
Figure VI.2. Processus de transfert de conteneurs	116
Figure VI.3. Schéma explicatif	120
Figure VI.4. Captures d'écran de notre simulation	121
Figure VI.5. Taux d'occupation des engins de manutention (mode planifié).....	125
Figure VI.6. Taux d'occupation des engins de manutention (mode massifié).....	126
Figure VI.7. Couplage optimisation/simulation.....	128
Figure VI.8. Schéma de circulation en Noria.....	129
Figure VI.9. Circulation en mode de transfert optimisé.....	135
Figure VI.10. Circulation en mode de transfert massifié	136
Figure VI.11. Circulation en mode de transfert planifié	136
Figure VI.12. Interface graphique	138
Figure VI.13. Nombre de conteneurs en fin de journée pour le scénario 4-2-4.....	139
Figure VI.14. Nombre de conteneurs en fin de journée pour le scénario 5-2-5.....	140
Figure VI.15. Taux d'utilisation des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 4-2-4.	141
Figure VI.16. Taux d'utilisation des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 5-2-5.....	141
Figure VI.17. Taux de déplacement des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 4-2-4.....	142
Figure VI.18. Taux de déplacement des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 5-2-5.....	143

CHAPITRE I : INTRODUCTION GÉNÉRALE

Durant ces dernières années, les marchés ont fortement évolué et sont devenus concurrentiels. De nouvelles contraintes sont apparues avec l'offre qui est devenue supérieure à la demande nécessitant une maîtrise des différents aspects de performance. Pour se démarquer de la concurrence, les entreprises cherchent à apporter de meilleures réponses à leurs clients, ne cessant de faire évoluer leurs produits sans négliger la qualité de leurs services. En outre, la conception du système de fonctionnement d'une entreprise doit assurer que les investissements adaptés à la production actuelle restent adaptés aux besoins de sa production de demain. Pour ceci, et compte tenu de l'évolution des marchés, de nombreux travaux identifient le problème de conception et d'acquisition de biens technologiques comme une décision de première importance. Il s'agit non seulement d'investir initialement dans l'installation et la mise en œuvre d'une organisation industrielle, mais également tout au long de son cycle de vie. Par ailleurs, étant donné qu'une chaîne logistique est un réseau d'entreprises traversé par différents types de flux, son pilotage et l'évaluation de sa performance demeurent donc des tâches difficiles, conditionnées par la nature et la diversité des flux.

La chaîne logistique portuaire est un maillon très sensible au sein d'une chaîne logistique globale. En effet, dans le domaine maritime, il est essentiel de respecter les délais de livraison et de réduire les coûts des différentes opérations de manutention et de transfert de conteneurs, en tenant en compte de la productivité du port. L'amélioration de la performance d'un port est souvent un enjeu très important, notamment en raison des coûts considérables inhérents à sa gestion. Un terminal maritime à conteneurs est un système complexe où la manutention et le transport de conteneurs jouent un rôle crucial. Sa performance dépend de la pertinence des décisions, tant au niveau stratégique et tactique qu'opérationnel. A chaque niveau, plusieurs problèmes se dégagent, tels que l'ordonnancement des équipements de manutention, l'affectation des navires aux quais ou l'optimisation des espaces de stockage. Les gestionnaires font face donc à de nombreux défis de prise de décision au niveau des quatre zones, à savoir : l'interface maritime, la zone de transfert interne, la zone de stockage, et l'interface terrestre. La complexité est liée à de nombreuses variables de décision et de contraintes, aux objectifs contradictoires, aux incertitudes et aux informations peu fiables.

Face au flux croissant de conteneurs, aux contraintes de compétitivité de plus en plus rigoureuses, à l'augmentation remarquable de la capacité des porte-conteneurs, à la congestion qui en résulte et au coût d'exploitation accru des porte-conteneurs, tout terminal à conteneurs doit assurer sa croissance et sa rentabilité, tout en sachant maîtriser ses impacts

environnementaux. Par ailleurs, faute d'augmenter l'espace et le nombre de ressources des terminaux, il reste à adapter le flux aux moyens existants et à améliorer la fluidité du flux.

Dans ce contexte, pour y répondre, l'autorité portuaire du Havre a entrepris la construction d'un terminal multimodal. En effet, Le Havre bénéficie d'une situation géographique privilégiée à l'entrée du range nord-ouest de l'Europe et irrigue les marchés parisien, français et européen. Cette position stratégique fait du port du Havre le premier port français pour le commerce extérieur. Il est le premier port en France en termes de trafic conteneurisé avec plus de 2.5 millions d'EVP en 2013.

Le projet multimodal est l'un des projets majeurs du Grand Port Maritime du Havre (GPMH). L'objectif est d'augmenter la part modale des transports massifiés qui est très en retrait en France par rapport aux ports concurrents du nord de l'Europe (Rotterdam, Hambourg, etc.). D'un point de vue écologique, le but est de diminuer le trafic routier en utilisant plus le transport ferroviaire et fluvial. Le transfert de conteneurs entre les terminaux maritimes et le terminal multimodal du Havre est assuré par des navettes ferroviaires. Ce transfert de conteneurs est un facteur clé de la compétitivité du port du Havre. Cette nouvelle configuration du port du Havre nécessite d'organiser des tournées de navettes ferroviaires afin de transférer les conteneurs entre les terminaux maritimes et le futur terminal multimodal. Cette organisation de terminaux à conteneurs et de réseaux de transfert constitue la chaîne logistique portuaire avec des problèmes de gestion des ressources et des risques sécuritaires au niveau des processus de réception, de manutention et de livraison.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de deux projets ESSIMAS (Evaluation par Simulation de Solutions Innovantes pour le développement du transport Massifié sur l'Axe Seine par coupons ferroviaires électriques) et DCAS (Direct Cargo Axe Seine) portés par le GPMH.

Nos recherches traitent de l'évaluation de la performance des terminaux portuaires, plus particulièrement, des processus de manutention et de transfert massifié des conteneurs par des navettes ferroviaires entre le terminal multimodal et les terminaux maritimes du port du Havre. L'enjeu principal consiste à améliorer la fluidité des conteneurs et à déterminer le mode de transfert des conteneurs le plus performant en termes de taux de service, du nombre de wagons des navettes, du nombre de locomotives, du volume de CO₂ et du nombre d'aller-retour des navettes. Les processus de transfert et de manutention des conteneurs sur le domaine portuaire ont été modélisés en UML.

Nous avons d'abord simulé et évalué la performance de deux modes d'exploitation : le mode planifié qui respecte les dates de livraison des conteneurs et le mode massifié qui respecte les taux de remplissage fixés.

Ces deux modes nécessitent l'utilisation de plusieurs ressources, entre autres, le nombre de locomotives qui sont très coûteuses. Pour pallier cet inconvénient, un mode d'exploitation optimisé a été adopté. Il est basé sur une approche d'optimisation et de simulation dans laquelle les variables de décision de la simulation sont déterminées par l'optimisation. L'objectif est, d'une part, de dimensionner les navettes, c'est-à-dire, minimiser le nombre de wagons nécessaires à la composition des navettes, et d'autre part, de minimiser le nombre de tournées des navettes et le nombre de locomotives.

Pour évaluer ces modes d'exploitation, nous nous intéressons à la performance opérationnelle. Le choix des indicateurs de performance ne doit pas se faire à la légère, mais plutôt d'une manière pertinente suivant une démarche structurée. Il est alors nécessaire d'avoir une approche et des outils méthodologiques adéquats. Dans ce contexte, nous avons proposé une méthode pratique qui permet dans un premier temps, de modéliser une chaîne logistique. Ensuite, d'identifier les indicateurs appropriés à chaque niveau pour l'évaluation de la performance. En nous appuyant sur la méthode ECOGRAI, nous avons proposé une démarche, dénommée ECOGRAISIM, qui consiste à modéliser le fonctionnement des activités, de préciser l'organisation des processus afin de déterminer les indicateurs de performance et enfin, d'utiliser la simulation pour évaluer les modes d'exploitation en se référant aux indicateurs de performance obtenus.

Ce mémoire s'articule autour de sept chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons le cadre général de nos travaux de recherche. Après avoir décrit le contexte, nous précisons notre problématique générale, nos objectifs et notre démarche.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons, des notions concernant la chaîne logistique portuaire et les concepts de sa gestion. Nous définissons les différents composants de la chaîne logistique et nous présentons les différents types de flux échangés entre les maillons de la chaîne. Nous présentons également des informations générales sur les enjeux du transport conteneurisé maritime, dont le but est d'améliorer la productivité et les performances des activités portuaires. Une telle analyse fournit les éléments nécessaires à la formulation, et à la compréhension de notre problématique.

À la fin de ce deuxième chapitre, nous décrivons le contexte de notre étude en nous focalisant sur les problèmes liés à la gestion des terminaux à conteneurs du port du Havre.

Le troisième chapitre, comporte deux parties. Dans la première partie, les principaux problèmes des terminaux à conteneurs connus dans la littérature sont exposés. Quant à la deuxième partie, elle présente les différentes méthodes et approches de résolution ainsi qu'une étude comparative des travaux d'optimisation et de simulation. L'objectif est d'avoir une vue générale sur les méthodes de résolution afin de préciser celle qui sera utilisée dans la suite de ce travail.

Dans le quatrième chapitre, nous nous focalisons sur l'évaluation de la performance des chaînes logistiques portuaires en utilisant la simulation. Notre objectif consiste, tout d'abord, à proposer une démarche permettant de déterminer les indicateurs de performance que nous allons mesurer. Pour ceci, un état de l'art sur la performance et sur les outils d'évaluation de celle-ci est présenté. À partir de ces éléments, une démarche d'aide à la détermination d'indicateurs de performance, ECOGRAISIM, a été proposée pour le pilotage des chaînes logistiques portuaires.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons d'abord notre première contribution ECOGRAISIM, qui combine la méthode ECOGRAI et la simulation afin de déterminer et de mesurer les indicateurs de performance. ECOGRAISIM offre une étape supplémentaire qui consiste à montrer efficacement comment peut-on agir sur le système à évaluer. Ensuite, nous présentons notre deuxième contribution, une modélisation orientée objet du nouveau schéma logistique du port du Havre en utilisant le langage UML. Nous précisons également notre contribution concernant la phase d'évaluation de la performance par ECOGRAISIM.

Dans le sixième chapitre, nous nous sommes intéressés aux indicateurs de performance. Notre objectif est la simulation du transfert des conteneurs afin de valider les différents choix fonctionnels. Cette simulation permet, d'une part, de mesurer et de calculer les indicateurs de performance qui ont été déterminés dans le chapitre précédent, et d'autre part, d'évaluer la performance du terminal. Une étude comparative des différents modes d'exploitation a permis de retenir le mode de transfert optimisé. Ce mode a été ensuite appliqué sur l'ensemble des terminaux à conteneurs.

Enfin, dans le septième chapitre, une conclusion générale est donnée à la fin de ce mémoire faisant le bilan des travaux effectués et des résultats obtenus. Des perspectives sont également évoquées.

CHAPITRE II : LA CHAÎNE LOGISTIQUE PORTUAIRE

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	17
2. LA CHAÎNE LOGISTIQUE.....	17
2.1. La chaîne logistique portuaire	18
2.2. Les processus de la chaîne logistique portuaire	20
3. LES FLUX DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE.....	20
3.1. Pilotage de flux.....	21
4. GESTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE PORTUAIRE.....	23
5. LES TROIS REVOLUTIONS	24
6. UN TERMINAL A CONTENEURS	26
6.1. Les différentes zones d'un terminal à conteneurs	27
7. LE TRANSPORT MARITIME, LE TRANSPORT MASSIFIÉ ET LA MULTIMODALITE	30
7.1. Transport routier.....	30
7.2. Transport maritime ou fluvial	31
7.3. Transport ferroviaire	31
..... vers un mode multimodal	31
8. CONTEXTE ET TERRAIN D'ÉTUDE : PORT DU HAVRE	33
8.1. Le terminal Multimodal du Havre.....	34
8.2. Les projets ESSIMAS et DCAS	37
8.3. Objectifs	38
9. CONCLUSION	39

1. INTRODUCTION

C'est seulement à partir des années 70 et avec la crise économique que les travaux portant sur la logistique ont commencé à apparaître en vue d'améliorer et d'optimiser les différents flux concernant les entreprises. En effet, avec la forte concurrence sur les marchés, l'enjeu principal est de produire et de livrer dans les meilleurs délais en réduisant les différents coûts et en satisfaisant les clients qui sont généralement séparés géographiquement et se situent de plus en plus loin des centres de livraison.

Le contexte général de notre étude concerne la gestion des flux de transfert massifié de conteneurs des terminaux maritimes du port du Havre. Ces terminaux, dotés d'un important poids en termes de coût, doivent être beaucoup plus efficaces qu'auparavant en minimisant les coûts et les temps de passage des conteneurs et ainsi contribuer à l'optimisation de l'ensemble des processus de la chaîne. Nous nous intéressons tout particulièrement au pilotage de flux physique via différents modes d'exploitation et à l'évaluation de leur performance.

Dans ce chapitre, nous introduisons des notions concernant la chaîne logistique portuaire et les concepts de sa gestion. Après ces définitions générales de la chaîne logistique, nous donnerons des définitions de différents composants de la chaîne logistique et nous présenterons les différents types de flux échangés entre les maillons de la chaîne. Nous mettons également l'accent sur les enjeux du transport conteneurisé maritime dont le but est d'améliorer la productivité et les performances des activités portuaires.

La fin de ce premier chapitre, décrit le contexte de notre étude en nous focalisant sur les problèmes liés à la gestion des terminaux à conteneurs du port du Havre.

2. LA CHAÎNE LOGISTIQUE

L'origine du terme logistique est issue du grec « logistikos ». Dans son sens le plus courant, la logistique désigne « la partie de l'art militaire ayant trait au problème de ravitaillement et de transport des armées » (Définition du Petit Larousse). La logistique est devenue une des clés essentielles pour assurer la compétitivité des entreprises et sa fonction concerne l'ensemble des domaines qui touchent aux flux physiques, aux flux d'informations et aux flux de décisions. Il est possible de distinguer quatre grandes familles logistiques [La logistique en France, 2015] :

- la logistique amont ou d'approvisionnement : vise à assurer la circulation des produits entrants et sortants des sites de production ;

- la logistique interne ou de production : correspond aux flux de fabrication à l'intérieur du lieu de production ou d'assemblage ;
- la logistique aval : répond à l'approvisionnement des réseaux de distribution ;
- la logistique inverse : correspond aux flux de produits ou d'éléments non utilisables tels quels vers des sites de stockage, de retraitement ou de recyclage.

La logistique concerne tous les maillons qui communiquent avec l'entreprise : on parle alors de chaîne logistique « Supply Chain ». Ce terme anglais « Supply Chain » signifie littéralement « chaîne d'approvisionnement ». Il existe plusieurs définitions de la chaîne logistique dans la littérature [Tan, 2001]. [Smata, 2013], présente une revue des définitions les plus citées au niveau académique du terme chaîne logistique.

Zouggar [Zouggar, 2009] donne la définition suivante : « *La chaîne logistique peut être considérée comme un ensemble d'activités en réseaux dont l'exécution est corrélée par les flux qu'elles échangent, visant à satisfaire au mieux les besoins exprimés par un ensemble de clients* ». Et selon [Cheyroux, 2003] une chaîne logistique est définie comme suit : « *C'est un réseau de sites, indépendants ou pas, participant aux activités d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution liées à la commercialisation d'un produit ou d'un service* ». Une chaîne logistique peut être définie alors comme un réseau constitué par un ensemble d'entreprises participant aux différentes activités et qui collaborent afin d'améliorer leur performance.

2.1. La chaîne logistique portuaire

Le périmètre d'une chaîne logistique se définit selon la nature de son contexte. Les entreprises peuvent être situées sur un ou sur plusieurs sites géographiques. Notre travail de thèse concerne la chaîne logistique portuaire et plus précisément les terminaux à conteneurs.

Un terminal à conteneurs est considéré comme un maillon sensible de la chaîne logistique portuaire. C'est un système complexe où la manutention et le transport de conteneurs jouent un rôle crucial [Henesey, 2006]. La performance des terminaux dépend des décisions aussi bien stratégiques que tactiques et opérationnelles prises par les gestionnaires de la chaîne logistique portuaire. La figure II.1 montre les différents acteurs de la chaîne logistique portuaire :

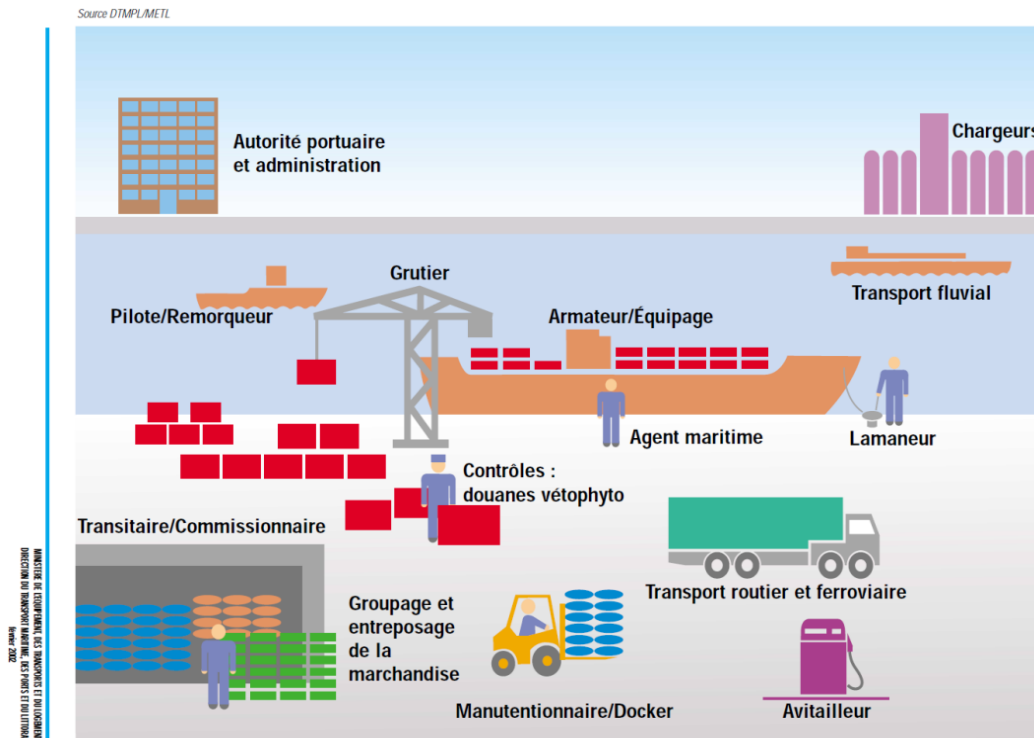


Figure II.1 : Représentation de la communauté portuaire (Source : [Nidra, 2002])

- Le docker : charge et décharge le navire.
- Le transporteur interne (inland transport) : transporte les conteneurs au niveau du terminal.
- L'opérateur portuaire (port operator) : contrôle les opérations à l'intérieur du port. Il pourrait être une autorité publique du port (port authority).
- L'aconier (stevedore) : s'occupe de la préparation juridique et matérielle des opérations de réception, de déplacement et d'entreposage des marchandises.
- L'armateur (shipping line/alliance) : assure le transport maritime des marchandises.
- Le consignataire (consignee) : Il est mandaté par l'armateur, il agit au nom et pour le compte de l'armateur. Il doit assurer toutes les opérations de réception ou de livraison de la marchandise et, ainsi effectuer les missions confiées par l'armateur.

Il y a également d'autres acteurs pour assurer les services liés à la gestion des navires comme :

- les sociétés d'avitaillement ;
- les sociétés de réparation et de maintenance de conteneurs ;
- les entreprises de récupération des déchets des navires.

Enfin, l'autorité portuaire dont la mission consiste à gérer tout le port en prenant en compte la gestion :

- des installations portuaires ;
- de l'accueil et le départ des navires ;
- du respect des règlements, etc.

La chaîne logistique portuaire est donc définie comme un ensemble d'entités impliquées directement dans les flux amont et aval de marchandises.

2.2. Les processus de la chaîne logistique portuaire

Un processus est défini comme un enchaînement logique d'activités dans le temps afin de réaliser un but en transformant des éléments d'entrée en éléments de sortie. Dans la chaîne logistique portuaire, plusieurs processus sont combinés afin de livrer la marchandise à son client final. Les principaux processus pour les pré- et post-acheminements portuaires de marchandises doivent se compléter (Figure II.2).

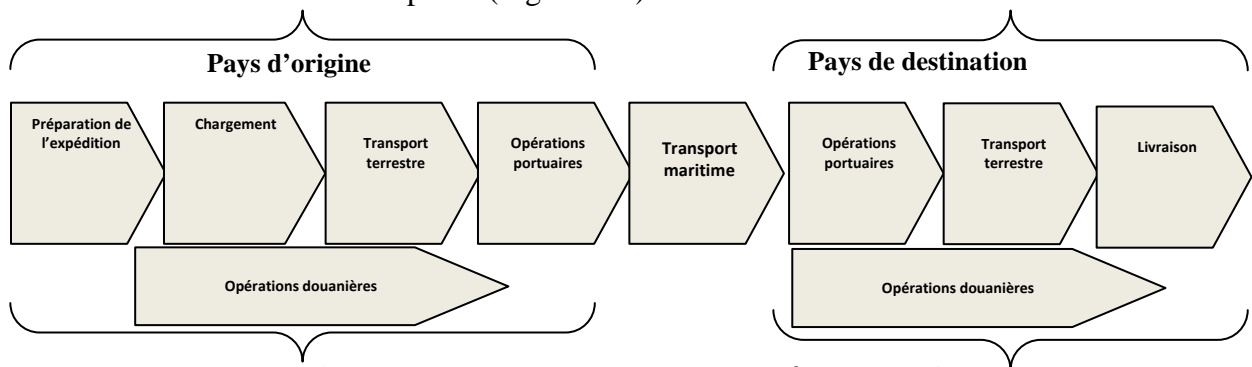


Figure II.2 : Les processus de la chaîne portuaire

(Source : Inspiration de [Ministère de l'équipement et Bearingpoint France, 2005])

3. LES FLUX DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE

L'enjeu majeur pour toute entreprise est de rester compétitive. Pour atteindre cet objectif, le pilotage de ses flux à des coûts réduits en satisfaisant ses clients est une nécessité incontournable [Estampe et al, 2008]. Dans ce contexte, la performance d'une chaîne logistique dépend fortement de la coordination entre ses acteurs. Le pilotage de la chaîne logistique nécessite une bonne maîtrise des différents flux circulant au sein de cette chaîne. En général ces flux sont classés en trois types et toute organisation qui participe à la circulation de ces différents flux, est considérée comme un maillon ou un acteur de la chaîne logistique (Figure II.3).

a. Le flux informationnel

C'est un flux bidirectionnel. Il concerne les échanges d'information entre les acteurs de la chaîne. L'information peut refléter une situation donnée, un ordre à exécuter, un nombre de produits à livrer, une information destinée aux clients, etc.

b. Le flux physique

Ce flux concerne la circulation des produits qui traversent la chaîne logistique. Ce flux peut représenter la matière première, les produits finis, ou les unités de transport.

c. Le flux financier

Le flux financier, encore appelé flux monétaire, est associé au flux physique à savoir les achats, les ventes, les remboursements, etc.

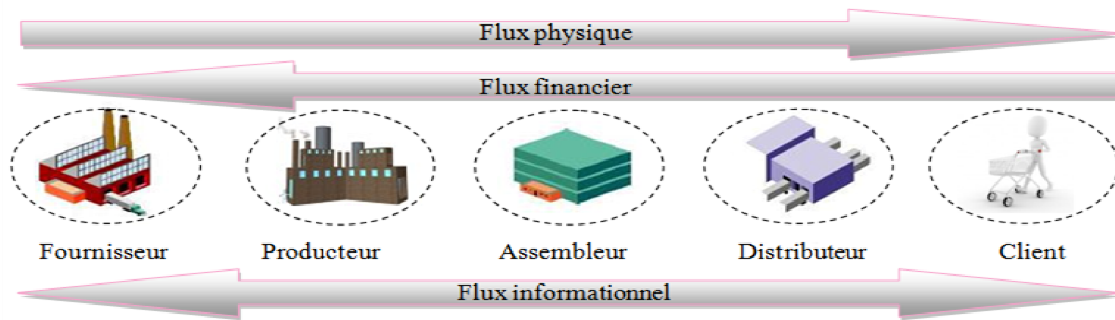


Figure II.3 : Représentation des flux dans la chaîne logistique (Source : [Greis et Kasarda, 1997])

Dans cette thèse, nous nous focalisons sur les flux physiques et les flux informationnels dans la chaîne logistique portuaire. En effet, le flux informationnel joue un rôle très important pour rendre la chaîne portuaire compétitive. Les terminaux portuaires utilisent des nouvelles technologies (RFID par exemple) qui permettent de surveiller, de gérer les équipements et de localiser les conteneurs [Rizzo et al, 2010]. Ces nouvelles technologies permettent également d'échanger des données et des informations avec les autres maillons de la chaîne. Ces informations peuvent être par exemple : les dates d'arrivée et de départ des conteneurs et des différentes unités de transport et l'emplacement des conteneurs [Najib, 2014]. Concernant le flux physique, il concerne des objets qui circulent au sein de la chaîne portuaire, tels que les conteneurs, les moyens de transport de conteneurs (trains, camions, navires, etc.).

3.1. Pilotage de flux

Les entreprises qui constituent une chaîne logistique sont liées par ces flux physiques, ces flux d'informations et ces flux financiers. Ces entreprises doivent collaborer afin d'optimiser la chaîne logistique à laquelle elles appartiennent en satisfaisant leurs propres objectifs tout en visant les objectifs globaux de la chaîne. L'objectif d'une telle collaboration est de pouvoir prendre des décisions pour l'intérêt de tous les maillons de la chaîne logistique

[Pan, 2010]. En général, ces décisions sont classées en trois niveaux, à savoir : niveau stratégique, niveau tactique et niveau opérationnel. (Figure II.4) :

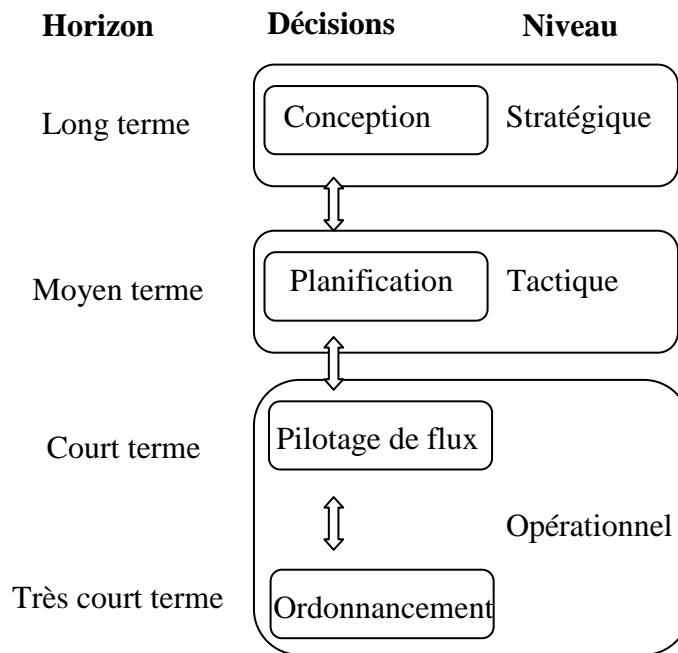


Figure II.4 : Niveaux de décisions de la chaîne logistique portuaire [Inspiration de Babaï, 2005]

a. Niveau stratégique : les objectifs fixés sont à atteindre à long terme. Les décisions concernent par exemple :

- la localisation et la conception des terminaux portuaires ;
- la détermination de la capacité des terminaux ;
- la conception d'un réseau de transfert ;
- le choix de nouveaux partenaires ;
- la construction de nouvelles installations.

b. Niveau tactique : les décisions à moyen terme concernent en général la planification de la chaîne logistique portuaire. Il s'agit d'effectuer :

- le choix du mode de transport ;
- la répartition des charges entre les terminaux ;
- l'affectation des ressources aux tâches.

c. Niveau opérationnel : à court terme et à très court terme. Les décisions concernant le pilotage des flux et l'ordonnancement sont définies.

Nos recherches se situent fortement au niveau opérationnel et plus particulièrement au niveau de la modélisation de la chaîne portuaire, le pilotage des flux (physique et

informationnel) et l'évaluation de la performance globale avec prise en compte des niveaux tactique et stratégique. L'objectif est de déterminer tout d'abord les critères de performance et ensuite de les mesurer par simulation.

4. GESTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE PORTUAIRE

Dans un monde économique exigeant et avec la croissance de flux de conteneurs dans les terminaux maritimes, les ports sont tenus à améliorer continuellement leur performance. Actuellement, la performance des ports ne cesse de progresser surtout par rapport à la rapidité, le coût, le choix des moyens de transfert et de manutention. En effet, le développement des moyens de transport et l'optimisation des chaînes logistiques ont contribué à atteindre cette performance. Cependant, la chaîne portuaire est l'objet de plusieurs éléments négatifs, comme : la congestion croissante des infrastructures routières et l'utilisation importante d'énergie non renouvelable et par conséquent l'augmentation de l'émission de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, [Le Mestre, 2006] affirme que : *« L'entreprise performante est alors une entreprise qui a su mettre en place des dispositifs de prévention et de gestion des conflits et qui parviendra à prendre en compte chacune de ces finalités financière, économique et sociale pour réaliser le moins mauvais compromis »*.

C'est dans ce contexte que le concept du Supply Chain Management « SCM » est apparu dans les années 1980 [Humez, 2008]. Le concept SCM concerne l'amélioration à la fois de l'efficience et de l'efficacité dans un contexte stratégique pour obtenir des avantages compétitifs qui rapportent du profit [Mentzer et al, 2001]. La gestion de la chaîne logistique portuaire consiste à se positionner au niveau de toutes les unités organisationnelles tout au long de la chaîne logistique (Clients, Dockers, Transporteurs, etc.) et d'assurer la coordination et les échanges en terme de flux physique, flux financier, flux d'information de telle manière que la marchandise soit manutentionnée et distribuée au bon endroit, au bon moment et au bon client. Selon [Smata, 2013], le SCM comprend deux principales composantes : l'intégration du réseau d'installations et la coordination des flux de matière et d'information afin d'améliorer la performance à long terme de chaque maillon de la chaîne logistique. L'analyse de la performance d'une chaîne portuaire peut se justifier par le rôle économique et financier majeur que représente l'activité des ports maritimes. Pour ceci, il faut savoir mesurer la productivité de chaque maillon en comparant sa valeur de production à la valeur des moyens mis à sa disposition. Il faut s'assurer également de son agilité en évaluant sa capacité à réagir face à des imprévus.

5. LES TROIS REVOLUTIONS

(Conteneurisation, Transport multimodal, Informatisation et automatisation)

La première révolution a donné naissance à un nouveau mode permettant d'acheminer les marchandises en utilisant des boîtes « conteneurs », il s'agit d'une révolution appelée conteneurisation. L'américain Mc Lean était à l'origine de cette révolution au début des années 1960. Ce nouveau concept de conteneurisation a permis une amélioration de la performance de la chaîne logistique comme les coûts de transport et la sécurité des produits. Les conteneurs sont conçus comme des unités standards qui peuvent faciliter la manutention et fluidifier le transport. Il existe trois types de conteneurs : 20 pieds, 40 pieds.

Le développement de la conteneurisation sur l'Atlantique Nord et sa généralisation progressive ont contribué à la croissance du transport maritime. L'introduction du conteneur dans la chaîne logistique portuaire a révolutionné le domaine du transport [ISEMAR, 2002]. La conteneurisation a permis l'amélioration des conditions de transport des marchandises, notamment dans le cas du transport multimodal. La Figure II.5 montre la croissance accrue et la mondialisation de la conteneurisation.

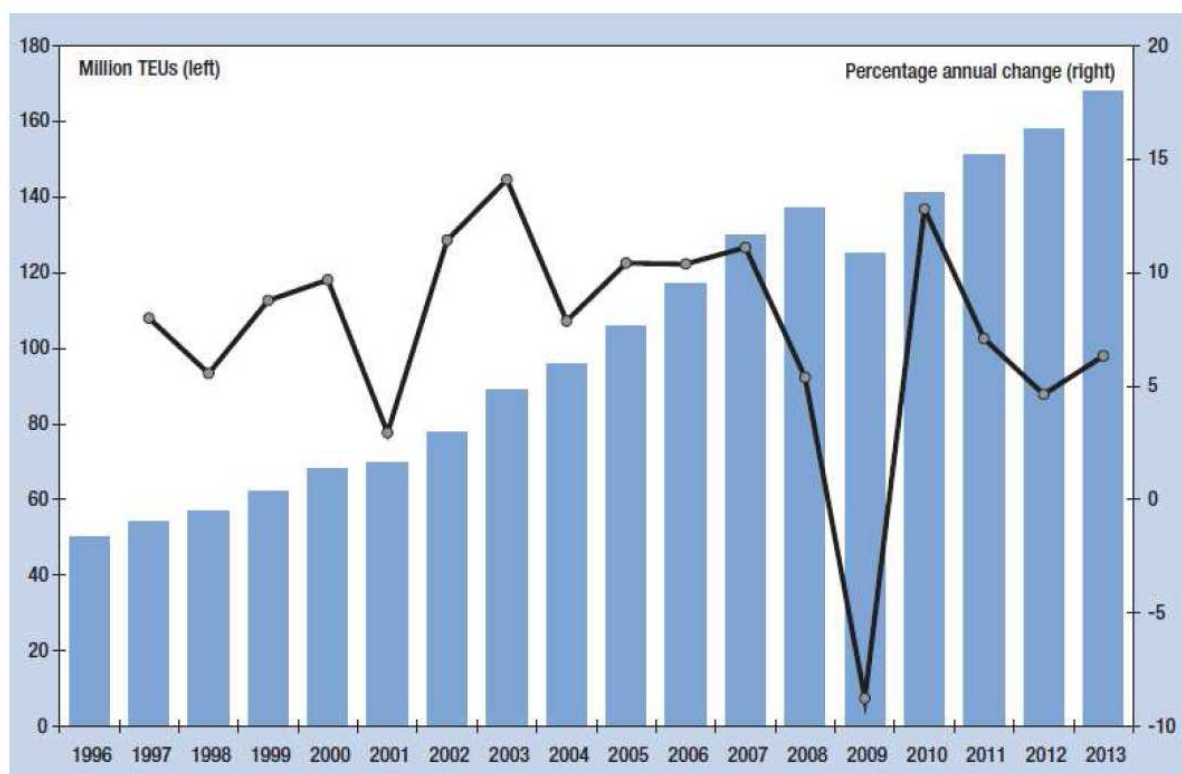


Figure II.5 : Traffic mondial de conteneurs (Source [UNCTAD, 2012])

Selon [Crainic et al, 2007] le nombre de conteneurs de la rotation mondiale était de 113 millions EVP¹ en 1993, cette croissance a atteint plus de 140 millions EVP en 2004 et en 2013[UNCTAD, 2012] le nombre d'EVP était de plus de 100 millions. (Figure II.5).

Regrouper les marchandises dans des conteneurs permet d'accélérer les opérations de chargement, de déchargement et de transfert entre les modes de transport. Le conteneur permet également d'assurer la marchandise contre certains risques de dommage à cause de fausses manipulations durant la manutention, vols et dégradations. Cependant, la température à l'intérieur des conteneurs peut provoquer certains dommages si elle n'est pas bien contrôlée. Le changement jour/nuit peut également cumuler de l'eau et entraîner des dégâts sur la marchandise sensible.

Quant à la deuxième révolution, elle concerne le transport multimodal des conteneurs [ISEMAR, 2002]. Il s'agit de combiner plusieurs modes de transport afin d'acheminer les conteneurs à destination. Son principe est de pouvoir transporter les conteneurs en utilisant les différents modes de transport, par camions, navires (barges) et trains. Le transport routier permet de garantir une certaine souplesse en évitant les transferts d'un mode à l'autre et une facilité de suivi. En revanche, les camions ne peuvent pas porter plus d'un conteneur de 40 pieds ou de deux conteneurs de 20 pieds. Les deux inconvénients majeurs de ce mode de transport sont le manque de massification et l'émission de CO₂. Tandis que les deux modes ferroviaire et fluvial permettent la massification du flux et génèrent moins de CO₂.

Enfin la troisième révolution vise l'informatisation et l'automatisation [ISEMAR, 2002]. En effet, la technologie offerte par l'informatique permet d'accélérer et de faciliter la circulation des différents documents concernant le transport maritime et ainsi de réduire les coûts liés aux différentes opérations liées au passage des conteneurs. Le but de cette révolution est également d'accélérer le transit des navires et des conteneurs dans les terminaux portuaires. Au niveau du port du Havre, il existe un progiciel Cargo Community System S one[S one]. Il automatise, agrège, optimise et sécurise les processus métiers des acteurs de la communauté logistique.

¹(EVP : Equivalent vingt pieds, un conteneur de 20 pieds = 1 EVP et un conteneur de 40 pieds = 2 EVP)

6. UN TERMINAL À CONTENEURS

Un port est défini comme un espace de transit des marchandises entre la mer et la terre et sa mission s'inscrit dans une logique collective mettant en relation l'ensemble des membres de la communauté portuaire. Un port est constitué d'un ensemble d'entreprises et de terminaux dont l'objectif est la gestion des navires et de la marchandise [LE PASSAGE PORTUAIRE, 2013].

Un terminal à conteneurs constitue un lieu équipé permettant la manutention et le stockage des conteneurs en import et en export (Figure II.6). C'est un ensemble de quais permettant le départ et l'arrivée des navires, de zones de stockage et de ressources pour le transport et les différentes opérations liées à la manutention des conteneurs [Henesey, 2006].

Chaque terminal à conteneurs est équipé par des :

- Quais : lieux d'arrivée et de départ des navires (Quay) ;
- Zones de stockage : espace destiné au stockage des conteneurs (Yard).

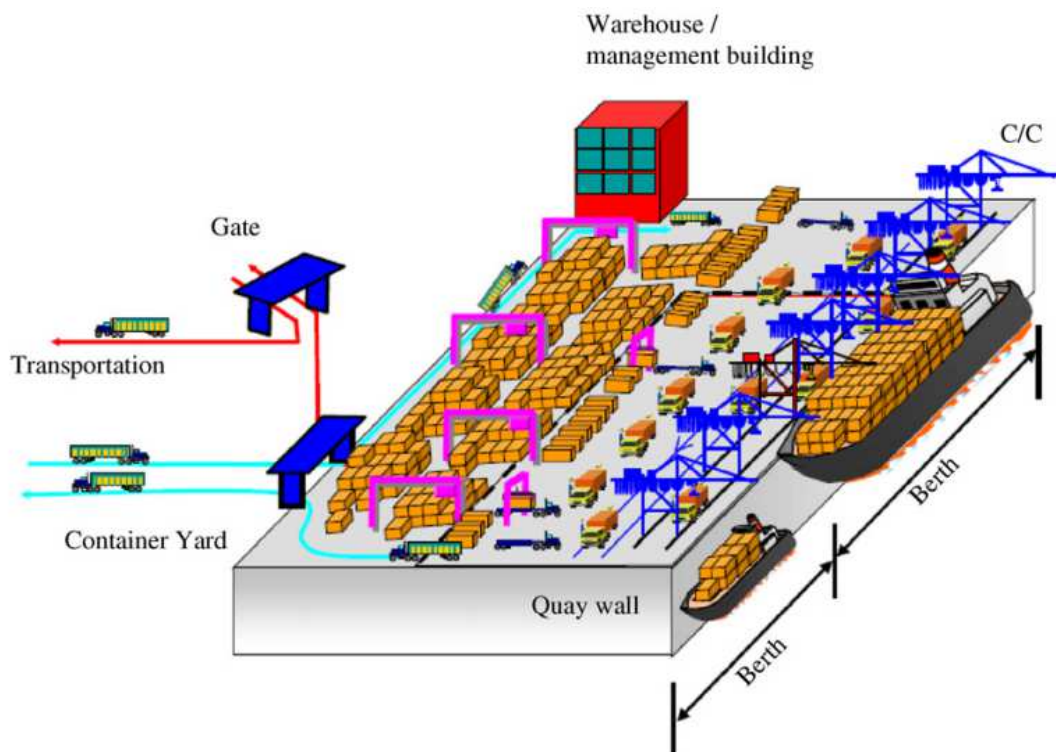


Figure II.6 : Exemple d'un terminal à conteneurs (Source [Ung, 2008])

Un terminal à conteneur peut utiliser différents types d'équipements pour assurer les opérations de manutention des conteneurs (Figure II.7) :

- Grues de quai : pour charger ou décharger les navires.

- Cavaliers, camions ou des véhicules à guidage automatique (AGVs) : pour transporter les conteneurs au sein du terminal à conteneurs. En effet, les chariots cavaliers peuvent charger et poser les conteneurs eux-mêmes, tandis que le chargement ou le déchargement des camions et des AGVs nécessite l'utilisation des grues.



Camion avec châssis



Reach Stacker



Chariot Cavalier



AGV

Figure II.7 : Différents équipements de transfert de conteneurs dans un terminal à conteneurs (Source [Henesey et al, 2006])

6.1. Les différentes zones d'un terminal à conteneurs

Un terminal à conteneurs peut être divisé en deux zones [Vis et al, 2005]: la zone de quai et la cour. La zone de quai comporte la partie d'arrimage des navires et les portiques ou les grues de quai qui assurent le chargement et le déchargement de conteneurs. La cour sert aux opérations de chargement, de déchargement sur la zone de stockage et de transbordement des conteneurs. Lorsqu'un navire arrive au port, la manutention de conteneurs par les grues de quai commence. Ils sont ensuite transférés par les véhicules qui circulent entre le navire et la pile de stockage. Cet empilement se compose d'un certain nombre de voies de circulation, où les conteneurs peuvent être stockés pendant une certaine période. Les voies sont desservies par des engins, tels que des grues ou des chariots-cavaliers qui peuvent à la fois transporter et

stocker des conteneurs dans la pile. Il est également possible d'utiliser des véhicules à guidage automatique (AVG).

Après une certaine période, les conteneurs quittent leur zone de stockage pour être livrés aux clients finaux via différents modes de transport, les barges, les navires, les camions ou les trains. La plupart des terminaux font usage de matériel manipulé par des dockers, comme les chariots cavaliers, les grues et autres. Cependant, quelques terminaux, comme des terminaux de Rotterdam, sont automatisés.

Dans [Henesey, 2006], un terminal à conteneurs peut-être divisé en quatre zones (Figure II.8) :

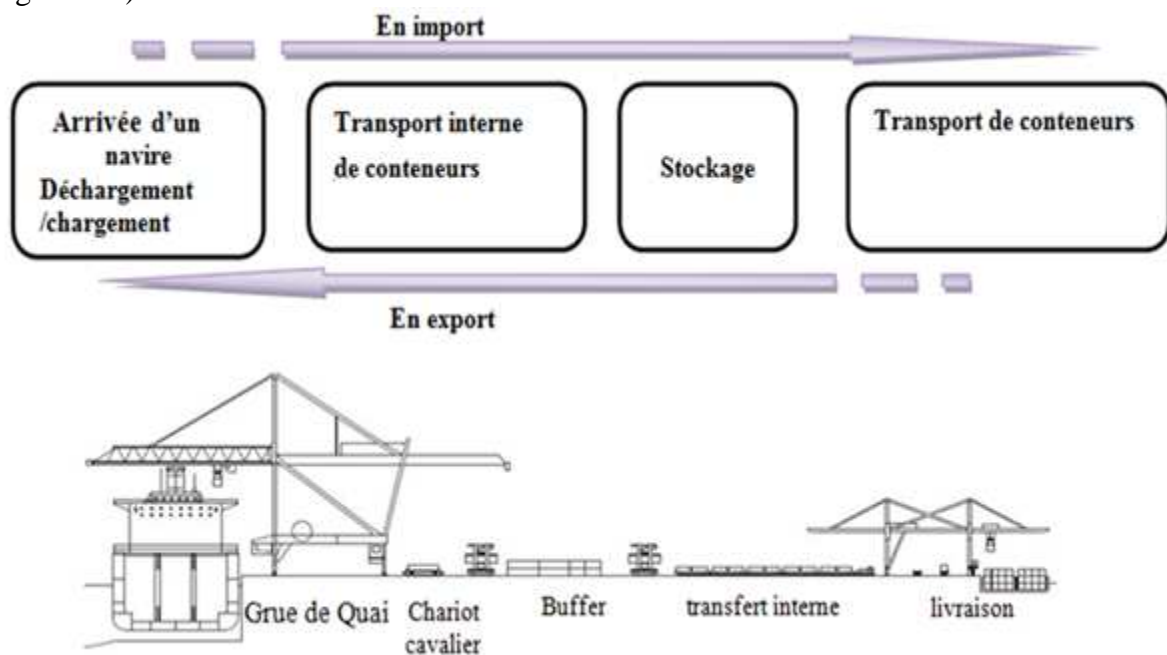


Figure II.8 : Les processus d'import et d'export des conteneurs dans un terminal, (inspiration de [Vis et de Koster, 2003])

1-L'interface maritime : elle constitue le point de départ et d'arrivée des navires. La minimisation du temps passé par un navire dans le terminal est l'un des indicateurs de performance de cette zone. L'allocation des postes à quai, l'arrimage de conteneurs, et l'allocation des grues de quais sont des problèmes quotidiens au niveau de cette interface.

2- La zone de transport interne : au niveau de cette zone, les conteneurs sont transportés par les véhicules à partir des zones d'échange vers les zones de stockage. Plusieurs travaux font état des problèmes liés à cet espace tels que la minimisation du nombre de véhicules nécessaires pour réaliser le transfert de conteneurs et la minimisation des déplacements de véhicules à vide.

3- La zone de stockage : elle est composée d'un nombre de voies appelées baies permettant l'empilement des conteneurs. Elle peut être équipée par des grues (Cranes) et des chariots cavaliers. Plusieurs problèmes se posent au niveau de cette zone [Armando et Stefano, 2012 ; Kefi, 2008], tels que : l'optimisation des déplacements des grues au niveau d'une zone de stockage, l'optimisation de l'espace de stockage.

4- La zone de transfert des conteneurs ou interface terrestre : après une certaine période passée dans la zone de stockage, les conteneurs stockés vont être chargés par les cranes afin de les transporter par différents modes de transport. Le problème majeur de cette zone concerne la gestion du transport multimodal [Benghalia et al, 2014a].

Selon [Vis et de Koster, 2003], un terminal à conteneurs peut être divisé en deux zones (Figure II.9) :

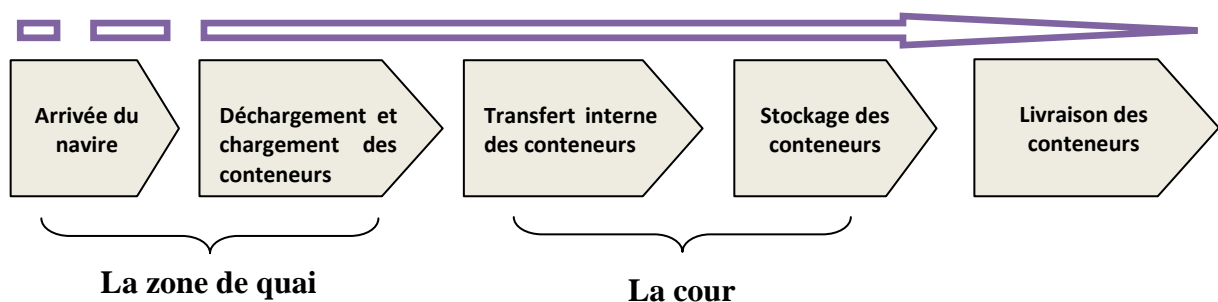


Figure II.9 : Les processus dans un terminal à conteneurs

a) la zone de quai : elle comporte la partie d'arrimage des navires et les portiques ou les grues de quai qui assurent le chargement et le déchargement de conteneurs.

b) la cour : elle sert aux opérations de transfert interne de conteneurs depuis la zone à quai et la zone de stockage ainsi aux opérations de chargement et de déchargement sur la zone de stockage.

Notre travail concerne la zone de transport interne ; plus précisément, nous nous intéressons à l'évaluation de la performance du transfert de conteneurs. Pour effectuer la manutention, un terminal à conteneurs a besoin de ressources qui varient selon la politique de gestion de chaque terminal. En général, il existe trois manières de gestion possibles pour un terminal maritime [Kefi, 2008] :

1) Le premier mode de gestion est fondé sur les grues d'empilement « Cranes » : en effet ce type de grues peut se déplacer et parcourir les différentes rangées de piles selon l'emplacement des conteneurs à manipuler. Ensuite le « Crane » charge le conteneur

recherché sur le véhicule qui va le transporter vers les grues de quai dans le cas d'export et le sens inverse pour le cas d'import.

2) Le deuxième mode de gestion, appelé le système alternatif, est fondé sur l'utilisation des cavaliers gerbeurs « straddle carriers » ou « yard machines » qui sont coûteux et qui exigent un espace considérable pour leur fonctionnement. En effet un cavalier gerbeur est capable de charger, décharger un conteneur ou rechercher un conteneur et le transporter vers un portique ou vers une grue de quai.

3) Le troisième mode qui n'est plus appliqué, facilite le fonctionnement du terminal mais nécessite un grand espace, indispensable pour son utilisation. Il consiste à empiler tous les conteneurs sur des châssis afin de les transporter vers les portiques.

7. LE TRANSPORT MARITIME, LE TRANSPORT MASSIFIÉ ET LA MULTIMODALITE

Le transport joue un rôle très important dans la chaîne logistique. En général, il existe deux types de transport, le transport de personnes (voyageurs) et le transport de marchandises. Ils sont considérés comme deux systèmes indépendants, même s'ils peuvent utiliser les mêmes infrastructures mais rarement les mêmes véhicules. Les coûts de transport ont un impact considérable sur les prix des marchandises. Il existe plusieurs modes de transport, entre autres : le transport routier, le transport maritime ou fluvial et le transport ferroviaire.

7.1. Transport routier

L'activité de transport routier est une activité sensible qui demande la maîtrise du flux de marchandises et l'amélioration des performances de la distribution aux clients afin d'assurer la livraison au bon moment et au bon endroit. Il est évident que les clients ont besoin d'être livrés rapidement et régulièrement afin de garder l'équilibre de leurs activités. Toutefois, si par malchance un accident se produit, dans ce cas et par conséquent il faudrait reprendre l'opération de livraison du début. Ceci produit une perte de temps ainsi que des coûts élevés et le tout amène à une mauvaise circulation en compliquant les tâches des transporteurs. Il y a également des nuisances pour les urbains qui sont en outre de plus en plus touchés par les embouteillages et la pollution. A cet effet il se dégage les enjeux suivants soulevés par l'organisation de la marchandise concernant les livraisons/enlèvements :

- Au niveau de la circulation : c'est-à-dire les interactions avec la circulation de personnes;

- Au niveau de la congestion;
- Au niveau des émissions atmosphériques.

7.2. Transport maritime ou fluvial

Le transport maritime est un mode de transport très important qui a fait un grand pas avec l'apparition de la machine à vapeur au XIX^e siècle. C'est un mode de transport massifié et pour réduire les coûts de ce mode, les navires sont de plus en plus grands et adaptés à un type de cargaison (porte-conteneurs, pétrolier, etc.). Actuellement, il y a des porte-conteneurs qui peuvent transporter jusqu'à 17 000 conteneurs EVP [NormandieActu, 2015], c'est l'équivalent de 20 000 camions ou plus de 200 trains complets. Cet avantage nécessite une bonne gestion de la manutention et une évacuation fluide afin d'éviter les problèmes de stockages et de réduire les temps de séjours des navires dans les terminaux.

7.3. Transport ferroviaire

Le transport ferroviaire entre un point A et un point B, du fait de sa massification, est plus économique que le transport routier [ISEMAR, 2002]. Ce qui le pénalise, ce sont les pré et post acheminements routiers aux points A et B. Au-delà du coût de ces activités, les contraintes organisationnelles propres au mode ferroviaire pour les maillons de la chaîne logistique, avant le point A et après le point B, pénalisent l'offre ferroviaire. Car du fait du processus de réservation pour circuler sur le réseau ferré, les trains ont des horaires fixes de départ et d'arrivée, auxquels doivent s'adapter les autres maillons de la chaîne du transport. En outre, la conduite des locomotives, les procédures d'attelage et dételage nécessitent des compétences et des qualifications ferroviaires spécifiques. Afin d'optimiser l'utilisation de ces ressources chères, les autres maillons doivent encore s'adapter.

..... vers un mode multimodal

Par ailleurs, le mode ferroviaire sera plus pertinent avec sa massification importante en le combinant avec le transport maritime ce qui permet d'éviter les ruptures de charge dues aux pré et post acheminements. Il permet également d'accélérer l'évacuation des conteneurs grâce à la grande capacité des porte-conteneurs [ISEMAR, 2002]. En effet, un train ou une barge peut contenir des centaines d'EVP, tandis qu'un camion ne dépassera pas deux EVP. Le tableau II.1 [Cheyroux, 2003] permet de faire une comparaison entre ces modes en fonction des deux critères : le prix (par tonnes.Kilomètres) et la vitesse (km/h). Les valeurs données sont approximatives et permettent de donner une vision sur chaque mode.

	Prix en euros (tonnes.kilomètres)	Vitesse (km/h)
Fluvial (barge)	3	10
Routier	8	70
Ferroviaire	4	60

Tableau II.1: Comparaison entre les modes de transport (Prix et Vitesse)

En associant ces différents modes, les conteneurs peuvent être acheminés alors par : camions, barges ou trains. Cet acheminement peut se faire mais à condition de satisfaire d'autres contraintes comme la distance à parcourir, les démarches administratives (par exemple les passages de douanes), la disponibilité des sillons pour les réseaux ferrés. Le transport multimodal est donc un mode qui permet d'assurer un certain équilibre par le fait de combiner plusieurs types de transport.

Dans le cadre du projet DCAS (Direct Cargo Axe Seine) du port du Havre présenté dans la section suivante, une nouvelle politique de transfert ferroviaire massifié est développée. Il s'agit d'effectuer le transfert de conteneurs par des navettes ferroviaires. Une navette est composée d'une locomotive et de plusieurs coupons. Chaque coupon comporte plusieurs wagons. Une rame est une navette sans locomotive. Les apports visés par le coupon sont les suivants :

- Une limitation et une simplification des manœuvres ferroviaires par un allotissement des conteneurs sur des groupes de wagons et des équipements de motorisation, d'attelage automatique et de télé-opération;
- Une réduction des contraintes organisationnelles propres au mode ferroviaire au point de collecte et de distribution en simplifiant le déplacement des coupons et permettant à d'autres personnels d'effectuer cette activité de déplacement des coupons et en apportant plus de libertés entre le mode ferroviaire et les activités logistiques aux points A et B.

8. CONTEXTE ET TERRAIN D'ÉTUDE : PORT DU HAVRE



Figure II.10 : Port du Havre (Source [Normandie actu, 2013])

Le port du Havre est le grand port de l'ouest européen avec 32 000 employés [Normandie actu, 2013]. C'est un port maritime de commerce et de passagers (64 332 millions de tonnes de marchandises ont transité par le port, en 2012). Le port du Havre dont la surface est 10 300 hectares, s'étend sur 27 km de l'est jusqu'à l'ouest et sur 5 km, du nord au sud. Il est classé en cinquième position en Europe et il est le premier port français par rapport au trafic de conteneurs avec 2303750 entrées et sorties en 2012. Selon le journal Normandie actu [Normandie actu, 2013], le port du Havre reçoit 6000 navires par an (paquebots, porte-conteneurs, chimiquiers, etc.), ce qui implique une trentaine d'entrées/sorties de navires par jour. Vincent Malfère, directeur général adjoint du GPMH (Grand Port Maritime du havre), lors de son entretien avec le journal Normandie actu [Normandie actu, 2013] a donné la réponse suivante par rapport aux atouts du GPMH : *« Son premier atout est naturel : il s'agit de sa situation géographique. Le port du Havre est le premier port touché par les navires en provenance de l'Asie et le dernier port, quand les navires repartent. Par ailleurs, le GPMH (Grand port maritime du Havre) est doté d'infrastructures de très bons niveaux, notamment à Port 2000. Un important programme d'investissements a été consacré dans ce sens. C'est ce qui nous permet d'ailleurs d'accueillir les navires de troisième génération comme le Marco Polo ou le Jules Verne, des bateaux de la CMA-CGM, qui transportent jusqu'à 16 000 boîtes. Enfin, le GPMH fonctionne 24h sur 24, 365 jours par an, ce qui est un avantage pour les*

navires, sans contrainte de passage d'écluse comme cela peut être le cas chez nos voisins. ».

Le tableau ci-dessous présente quelques statistiques concernant le port du Havre :

intitulé	2013			2012			variation		
	import	export	total	import	export	total	import	export	total
Total TRA-FIC hors avitaillement	48.139.203	19.032.797	67.172.000	46.272.646	17.243.507	65.516.153	4%	10.4%	5.8%
Navires(en nombre)	6.019	6.015	12.035	5.609	5.619	11.228	7.3%	7.0%	7.2%
Conteneurs (en nombre)	780.112	769.594	1.549.706	715.446	725.039	1.440.485	9.0%	6.1%	7.6%
Conteneurs (en EVP)	1.248.056	1.237.604	2.485.660	1.143.366	1.160.384	2.303.750	9.2%	6.7%	7.9%
Conteneurs (en EVP plein)	1.011.796	110.791	2.114.587	926.720	998.255	1.934.975	8.0%	10.5%	9.3%

Tableau II.2: Trafic du port du Havre

Néanmoins, 80 % des marchandises sont livrées à travers la route avec un nombre considérable de véhicules circulant au port (12 000 poids lourds et 50 000 véhicules légers). Les chargeurs, dans leurs cahiers des charges pour sélectionner les passages portuaires, exigent de plus en plus des offres de service importantes en termes de transport massifié multimodal. Ne pas pouvoir répondre à cette exigence conduirait le port du Havre à devenir un port de second rang. Le développement du multimodal et la réduction des gaz à effet de serre sont considérés comme une nécessité ou encore un enjeu stratégique. Pour rester compétitif, les autorités portuaires du Havre ont commencé à investir pour la construction de parcs logistiques.

8.1. Le terminal Multimodal du Havre

La figure II.11 montre que la situation du Havre, présente une part très faible pour les trafics ferroviaire et fluvial par rapport à celle des grands ports concurrents.

Pour faire face, l'autorité portuaire du Havre a entrepris la construction d'un terminal Multimodal. L'objectif est d'augmenter la part modale des transports massifiés qui est très en retrait en France [Agence Paris Centre Normandie, 2011] par rapport aux ports concurrents du nord de l'Europe. D'un point de vue écologique, le but est de diminuer le trafic routier en utilisant plus le transport ferroviaire et fluvial. Le transfert de conteneurs entre les terminaux maritimes et le terminal multimodal du Havre sera assuré par des navettes ferroviaires.

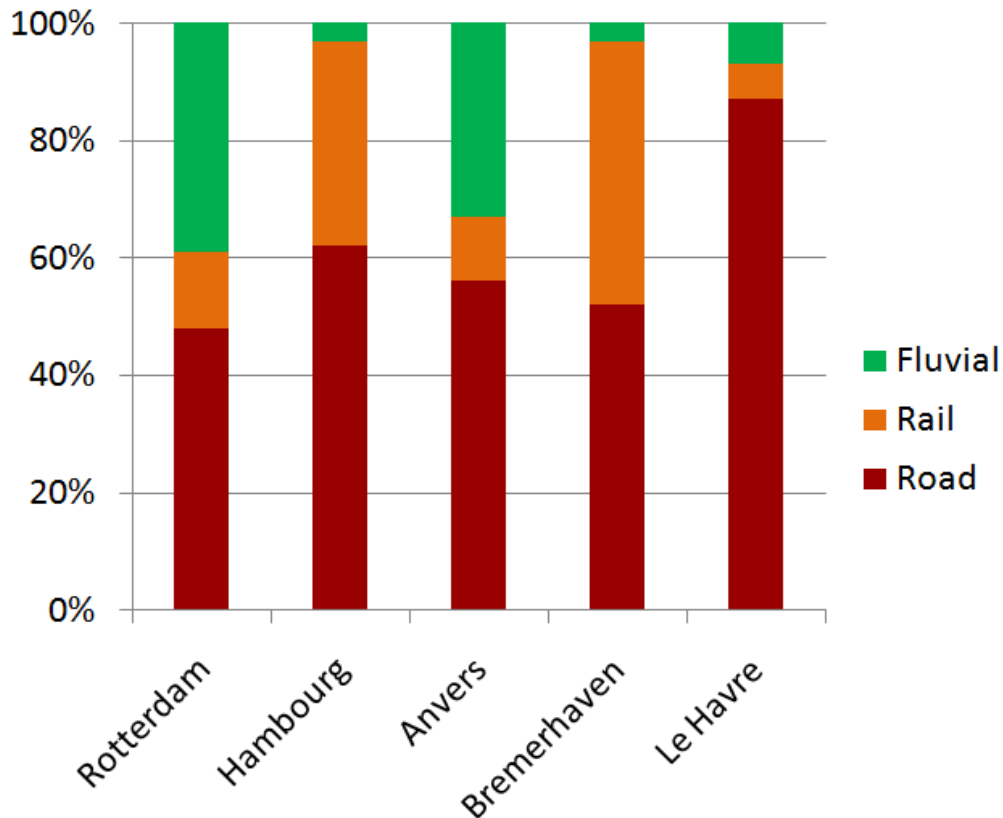


Figure II.11 : Parts modales pour le trafic des conteneurs dans le rang Nord. (2013)

Selon le journal LH Océane version du 16 au 13 mai 2013, le terminal Multimodal du Havre est la plus grande plateforme multimodale en France. L'objectif de sa création est de fluidifier le transport de marchandises sur la zone portuaire et de permettre une évacuation plus rapide des terminaux maritimes. Quant au président de la société d'investissement chargée de réaliser le chantier Multimodal LH2T (Le Havre Terminal Trimodal), il a déclaré que : « la plateforme, très attendue de nos clients portuaires, armateurs et logisticiens, contribuera à améliorer la compétitivité du port ».

Le terminal multimodal est donc une plateforme intermédiaire qui permet d'assurer le transport de conteneurs (collecte-livraison) en utilisant une nouvelle gestion des transferts de conteneurs par : trains, barges fluviales et route. Il permettra de gérer chaque année la distribution de 200 000 EVP. L'objectif est de massifier le transport de conteneurs en utilisant des navettes ferroviaires pour le transfert entre le terminal Multimodal et les différents terminaux maritimes d'une part. D'autre part, la livraison des conteneurs vers leurs destinations finales sera effectuée par des trains de grande ligne et des barges via l'axe Seine. Le terminal Multimodal sera composé d'une cour fluviale, d'une cour ferroviaire et d'une zone de stockage [Agence Paris Centre Normandie, 2011].

La cour fluviale sera composée de :

- Un quai fluvial contenant 2 postes à quai ;
- Deux portiques de manutention ;
- Un avant-bec permettant le traitement de barges ;
- Trois voies ferrées sous portiques ;
- Une zone de mise à terre ;
- Une voie ferrée en chaussée ;
- Une zone de stockage de conteneurs.

La zone de stockage de conteneurs

La cour ferroviaire comprendra :

- Deux voies ferrées destinées au déchargement de trains ;
- Huit voies ferrées ;
- Deux portiques de manutention.

Le faisceau de réception ou de soutien sera composé de :

- Un faisceau ferroviaire de six voies ;
- Deux voies pour accueillir les trains longs ;
- Une voie pour le stationnement des wagons ;
- Un garage de locomotives de trois voies ferrées.

- Les principaux terminaux dédiés au traitement des marchandises diverses, représentés majoritairement par le trafic conteneurisé, sont :

- Terminaux nord (Quais de l'Atlantique, Amériques, Europe) ;
- Terminaux sud (Quais de l'Asie, Osaka, Bougainville) ;
- Port 2000 : Terminal de France (TDF), Terminal de la Porte océane (TPO), Terminaux de Normandie associés à Mediterranean Shipping Company (TNMSC).

Il convient également de préciser les définitions suivantes :

- TM : Terminal Maritime ;

- TMM : Terminal MultiModal ;
- Coupon : est un ensemble de cinq wagons ;
- Rame : est un ensemble de coupons ;
- Navette : est une rame + une locomotive.

8.2. Les projets ESSIMAS et DCAS

Nos recherches s'inscrivent dans le cadre de ces deux projets portés par le GPMH. Le projet d'innovation ESSIMAS (Evaluation par simulation de Solutions Innovantes pour le développement du transport Massifié sur l'Axe Seine par coupons ferroviaires électriques), comprend deux étapes, chacune d'elles présentant un intérêt propre. La première concerne l'amélioration des transports massifiés ferroviaire et fluvial pour la partie produite sur le territoire du GPMH. En effet, cette première étape vise à rendre économiquement exploitable, la massification des conteneurs vers le futur terminal Multimodal sur le domaine portuaire et à permettre le développement de la massification du transport des conteneurs sur la voie d'eau et sur le rail vers Paris et au-delà. La deuxième concerne l'utilisation des mêmes solutions techniques afin de simplifier la structure des terminaux multimodaux, en réduisant l'espace nécessaire. Les innovations mises en œuvre pourront également être appliquées dans d'autres environnements portuaires. Nous avons été sollicités pour appliquer la simulation afin d'amender et de valider les options technologiques et organisationnelles pressenties.

Le projet DCAS (Direct Cargo Axe Seine) a pour objectif de mettre en œuvre une solution efficiente et rentable pour le transfert des conteneurs par navettes ferroviaires entre le terminal Multimodal et le terminal maritime Port 2000 d'une part et d'autre part entre le terminal Multimodal et le terminal maritime Atlantique. Ensuite, ce projet consiste à étudier le transfert de conteneurs entre le port du Havre et les grands centres urbains tels que Paris et Lyon.

Les navettes seront composées de coupons ferroviaires. Un coupon est un ensemble de wagons d'une centaine de mètres, motorisés, télé-opérables et munis d'attelages automatiques. Ces équipements visent à faciliter le tri ferroviaire et à rendre le transport ferroviaire plus flexible.

Ces deux projets visent à concevoir des outils technologiques et logistiques propres à rendre économiquement viables des liaisons ferroviaires, courte distance, à l'intérieur du domaine portuaire du Havre d'une part et entre le terminal Multimodal du Havre et des

centres logistiques de Paris d'autre part. Sur le domaine portuaire, les innovations recherchées permettront d'améliorer les transferts de conteneurs sur les barges du terminal Multimodal et rendront plus attractive la voie fluviale.

8.3. Objectifs

Notre cas d'étude est le futur terminal Multimodal du port du Havre avec un focus sur les processus de manutention et de transfert massifié par navettes ferroviaires. Le but était de proposer des modes d'exploitation performants pour le transfert de conteneurs entre le terminal Multimodal et le terminal Atlantique d'une part, et d'autre part, entre le terminal Multimodal et le terminal Port 2000 qui est composé des terminaux : TDF, TPO et TNMSC (Figure II.12).



Figure II.12 : Plan du Port du Havre

Une première modélisation du transfert des conteneurs entre deux terminaux maritimes et le terminal Multimodal a été réalisée lors du pré-projet ESSIMAS. Cette première phase a mis en exergue une des difficultés de cette modélisation : le fait que le terminal Multimodal ne soit pas encore construit et que les activités de transferts ne puissent pas être observées, a rendu difficile la description des différents acteurs et des différentes règles de gestion.

La simulation issue de cette première modélisation semble avoir globalement montrer des avantages économiques de la solution coupons DCAS par rapport à des rames classiques de coupons, néanmoins elle présente quelques défauts dûs au manque de règles de gestion.

Pour remédier à ce manque, le transfert des conteneurs sur le domaine portuaire a été modélisé en UML afin de clarifier les différentes activités et de vérifier la pertinence des concepts et leur cohérence, avant de les implémenter dans l'outil de simulation.

9. CONCLUSION

Nous avons décrit le contexte général de notre travail en définissant la chaîne logistique portuaire et en évoquant les enjeux des différents modes de transport. La complexité de la chaîne logistique peut se résumer dans sa configuration, l'analyse de son comportement, le pilotage de ses différents flux et à l'évaluation de ses performances.

En raison de la complexité croissante des terminaux à conteneurs, leurs gestionnaires font face à de nombreux défis de prise de décisions au niveau des quatre zones présentées dans la section 6. La complexité est liée à de nombreuses variables, de contraintes et aux objectifs contradictoires. En effet, les différents problèmes de prise de décision peuvent être considérés comme des problèmes d'ordonnancement, des problèmes de tournées de véhicules ou des problèmes d'affectation [Zehendner, 2013].

La création d'un terminal Multimodal pour le port du Havre est devenue une nécessité afin de pouvoir gérer la croissance du trafic maritime en offrant plus de possibilités concernant les moyens de transport massifiés (rail et fluvial). En effet, la multimodalité joue un rôle crucial en limitant l'utilisation intensive du transport routier. Le transport multimodal propose une nouvelle gestion des transferts physiques qui peut s'inscrire dans le cadre du développement durable, car il permet de diminuer la pollution [Mejri, 2012]. Au niveau du port du Havre, la construction du terminal multimodal est nécessaire pour :

- Répondre au besoin croissant de la massification du transport arrivant ou partant du Havre ;
- Faire progresser la part du port du Havre dans le trafic du transport et le commerce externe par rapport aux autres ports ;
- Renforcer l'attractivité du port du Havre ;
- Réacheminer les marchandises par route, rail et voie fluvial.

D'un point de vue écologique, la création du futur terminal Multimodal permettra de réduire l'émission du CO₂ en économisant, d'après une étude statistique, 500 000 tonnes de CO₂/an et également de réduire les charges et les dépenses en termes de ressources humaines [Haropa, 2015].

Dans le chapitre suivant nous allons présenter un état de l'art des différents problèmes portuaires ainsi que les différentes approches de résolution et notre démarche pour l'évaluation de la performance du transfert massifié de conteneurs.

CHAPITRE III : PROBLÈMES PORTUAIRES ET APPROCHES DE RÉOLUTION

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	43
2. PROBLÈMES PORTUAIRES.....	43
2.1. Problèmes liés à la zone à quai.....	46
2.1.1 Allocation des postes à quai	46
2.1.2 Arrimage de conteneurs	48
2.1.3. Ordonnancement des grues de quais	48
2.2. Problèmes liés à la cour.....	49
2.2.1. Ordonnancement des grues de la zone de stockage	49
2.2.2. Problème de Stockage de Conteneurs	50
2.2.3. Ordonnancement des véhicules de transfert interne des conteneurs	50
3. APPROCHES DE RÉOLUTION	51
3.1. Optimisation mathématique	51
3.2. Simulation	53
3.2.1. La simulation à événements discrets et simulation continue	55
3.2.2. La simulation Multi Agent	56
3.3. Choix de l'approche de résolution	57
4.CONCLUSION	59

1. INTRODUCTION

Étant donné qu'un terminal à conteneurs est un système complexe [Henesey, 2006; Brinkmann, 2011] où la manutention et le transport de conteneurs jouent un rôle crucial, sa performance dépend de la pertinence des décisions tant au niveau stratégique et tactique qu'opérationnel. En effet, l'augmentation croissante du trafic de conteneurs nécessite des ressources considérables au niveau des terminaux pour gérer efficacement les différents flux tout en considérant l'aspect environnemental. En outre, les compagnies maritimes exigent que le séjour de leurs navires soit optimisé en imposant des fenêtres de temps. L'enjeu est donc de minimiser les temps d'attentes des navires et d'assurer une manutention fluide pour satisfaire les exigences des compagnies maritimes. De plus, l'objectif des autorités portuaires consiste à maximiser la productivité en tenant compte des différentes opérations concernées. En effet, pour un terminal à conteneurs au niveau stratégique, il est nécessaire de déterminer l'équipement à utiliser et son agencement. Au niveau tactique, la capacité des équipements et des ressources humaines, l'affectation des voies et aussi les horaires des barges et des trains doivent être décidés. Le niveau opérationnel fait référence aux décisions nécessaires pour optimiser les différents processus internes. Enfin le niveau temps réel consiste à déterminer un ordonnancement de tâches en temps réel afin de l'adapter à un changement de situation ou à un incident.

Face à la complexité liée à la conception et à la gestion des terminaux à conteneurs, des travaux très variés ont été consacrés à chaque niveau décisionnel [Vis et de Koster, 2003; Steenken et al, 2004; Kim et al, 2006]. Les approches basées sur l'optimisation et la simulation ont été largement appliquées pour chercher des solutions aux problèmes qui se posent au niveau des terminaux à conteneurs tels que : l'ordonnancement des équipements de manutention, l'affectation des navires aux quais et l'optimisation des espaces de stockage.

Dans la première partie de ce chapitre nous présentons les principaux problèmes des terminaux à conteneurs connus dans la littérature. Quant à la deuxième partie, les différentes méthodes et approches de résolution ainsi qu'une étude comparative des travaux d'optimisation et de simulation seront présentées. L'objectif est d'avoir une vue générale sur les méthodes de résolution afin de préciser celle qui sera utilisée dans la suite de ce travail.

2. PROBLÈMES PORTUAIRES

Dans le sens import, lorsqu'un navire arrive au port, la manutention de conteneurs par les grues de quai commence. Les conteneurs sont ensuite transférés par les véhicules qui

circulent entre le navire et la zone de stockage. Cet empilement se compose d'un certain nombre de voies de circulation, où les conteneurs peuvent être stockés pendant une certaine période. Les voies sont desservies par des engins, tels que des grues ou des chariots-cavaliers qui peuvent à la fois transporter et stocker des conteneurs dans la pile. Après une certaine période, les conteneurs quittent leur zone de stockage pour être livrés aux clients finaux via différents modes de transport, les barges, les navires, les camions ou les trains.

Concernant le sens d'export, les conteneurs arrivent au port par camion, train ou barge. Ils sont ensuite répartis entre les blocs de la zone de stockage. Après une certaine période, les conteneurs sont chargés depuis la zone de stockage avec les portiques (Yard Cranes) afin de les transporter par les véhicules (Yard Truck) de transfert interne vers les quais où ils sont manipulés par des grues de quai (Quai Cranes) et déposés sur les navires.

La logistique des terminaux à conteneurs pose plusieurs problèmes de décisions [Henesey, 2006]. Cependant dans la littérature, à notre connaissance il n'existe pas une méthode qui permet de déterminer les décisions à prendre dans chacun des niveaux stratégique, tactique opérationnel :

a) Niveau Stratégique

A ce niveau stratégique, les gestionnaires doivent définir des objectifs à atteindre à long terme, il est indispensable de préciser l'équipement à utiliser et son agencement [Carlo et al, 2013 ; Petering, 2011 ; Sammarra et al, 2007; Lee et al, 2008] :

- Quand un navire arrive au port, il doit s'amarrer au quai. A cet effet, un certain nombre de quais sont disponibles. Le nombre de grues qui devraient être disponibles sur le quai est une des décisions qui doit être faite au niveau stratégique.
- Pour les opérations de déchargement et de chargement des conteneurs du navire, de transfert interne et de stockage de conteneurs, une des questions qui se posent, est la détermination du type d'équipements de manutention.

b) Niveau tactique

Concernant ce niveau, ce sont les objectifs à moyen terme qui doivent être pris [Petering, 2011; Kim et Park, 2002 ; Kim et al, 2006]:

- Au niveau de l'interface maritime, c'est le nombre de grues de quai affectées à un même navire qui doit être déterminé. L'objectif est de réduire le temps de séjour des navires au terminal. Il s'agit de servir tous les navires, tout en minimisant le retard total de leurs passages.

- Pour le transfert interne de conteneurs entre l'interface maritime et la zone de stockage, l'un des problèmes au niveau tactique qui doit être résolu est la détermination du nombre nécessaire d'engins de stockage et de transfert pour transporter les conteneurs dans le temps.

c) Niveau opérationnel

Enfin au niveau opérationnel ce sont les décisions à court terme [Carlo et al, 2013 ; Hartmann, 2002 ; Nishimura et al, 2005 ; Imai et al, 2006 ; Khoshnevis et Asef-Vaziri, 2000] :

- Pour l'interface maritime, l'attribution des postes à quai aux navires doit être décidée. L'objectif est de réduire le temps de séjour des navires et le nombre de mouvements, elle concerne l'affectation des postes d'amarrage et l'ordonnancement des grues de quai.

- Concernant la zone de transfert interne, il s'agit de minimiser les distances de voyage à vide, et le temps de la tournée totale des engins en déterminant quel véhicule transporte quel conteneur et sur quel itinéraire va circuler.

- Au niveau de la zone de stockage, la décision opérationnelle consiste à déterminer le meilleur chemin à suivre par les engins de stockage. Un de ses problèmes c'est le stockage des conteneurs en fonction de la destination, du poids et du type des conteneurs.

Classification des travaux : Le tableau ci-dessous présente une classification des problèmes des terminaux à conteneurs en fonctions des différentes zones et le niveau décisionnel correspondant [Vis et al, 2005 ; Steenken et al, 2004 ; Henesey et al, 2003b ; Henesey et al, 2004 ; Henesey, 2006 ; Henesey et al, 2006 ; Kim et al, 2006 ; Imai et al, 2006]. En se référant à ces derniers, nous présentons une classification de quelques travaux dans le tableau suivant :

Zones du terminal à conteneurs	Niveau Stratégique	Niveau Tactique	Niveau Opérationnel
Interface Maritime	[Kim et Park, 2004] [Moccia et al, 2006] [Sammara et al, 2007] [Lee et al, 2008]	[Imai et al, 2002]	[Hartmann, 2002] [Henesey et al, 2003b] [Henesey et al, 2004] [Henesey et al, 2006] [Imai et al, 2002] [Imai et al, 2006] [Kia, 2002] [Lee et al, 2002]
Zone de Transfert Interne	[Henesey et al, 2003a]	[Kim et Park, 2002] [Kim et al, 2006]	[Hartmann, 2002] [Nishimura et al, 2005][Imai et al, 2006]

	[Vis et al, 2005]		[Khoshnevis et Asef-Vaziri, 2000]
Zone de Stockage	[Zhang, 2003] [Henesey et al, 2003a]	[Kim et Kim, 2002]	[Gambardella, 2001] [Henesey et al, 2006] [Kim et Park, 2002] [Imai et al, 2006]
Zone de livraison			[Hartmann, 2002] [Henesey, 2003b] [Lee et al, 2002]

Tableau III.1. Classification des travaux sur les terminaux à conteneurs

2.1. Problèmes liés à la zone à quai

La gestion des opérations de la zone à quai contient plusieurs problèmes de décision tels que : l'allocation des postes à quai, l'arrimage de conteneurs et l'allocation des grues de quais :

2.1.1 Allocation des postes à quai



Figure III.1. Exemple : Affectation des navires à des postes à quai d'un terminal à conteneurs

Le problème d'allocation de postes d'amarrage consiste à affecter les postes à quai aux navires (Figures : III.1 et III.2). En effet, les navires arrivent en fonction du temps au port et ils doivent être affectés aux postes à quai afin de commencer la manutention des conteneurs [Kim et Moon, 2003]. L'objectif est de minimiser les temps d'attente des navires à quai et de maximiser le taux d'occupation des quais en prenant en compte le nombre fixe de postes d'amarrage et la variabilité du temps de manutention des conteneurs. Les contraintes et les

enjeux sont : la longueur du navire, la profondeur du quai, les fenêtres de temps, les priorités assignées aux navires et les zones d'accostage préférées pour minimiser les distances parcourues.

Le problème d'allocation de postes d'amarrage peut être traité [Imai et al, 2001] d'un point de vue statique (discret) ou dynamique (continu).

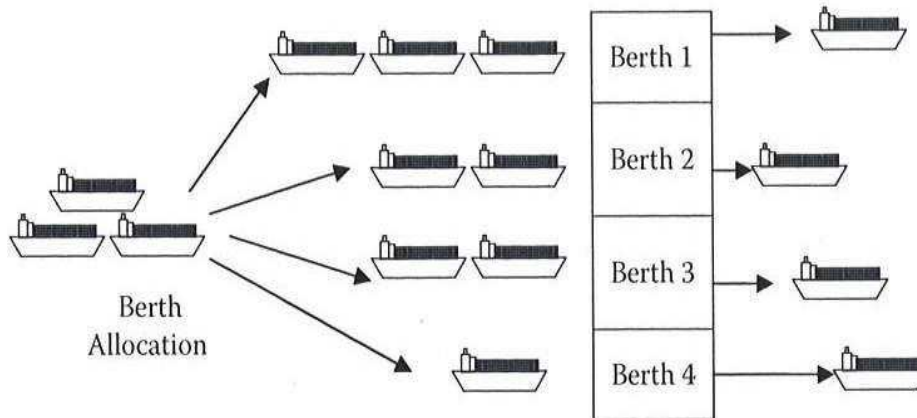


Figure III.2 Allocation des postes d'amarrage (Source [Kim, 2008])

a. Allocation discrète des postes d'amarrage : pour ce problème, les navires arrivés au port respectent les règles de circulation fixées par l'autorité portuaire. En effet, tous les navires doivent être au port avant le début du plan de manutention. [Monaco et Sammarra, 2007] considèrent le problème discret comme un problème d'ordonnancement dynamique avec des machines parallèles indépendantes. Ils ont développé une heuristique lagrangienne pour résoudre le problème. Des instances jusqu'à 30 navires et 7 points accostage sont résolues en fournissant des solutions quasi-optimales en un temps raisonnable.

b. Allocation continue des postes d'amarrage : les navires peuvent arriver après le début de la planification ce qui cause un temps mort entre deux navires affectés à un poste à quai. [Imai et al, 2005] traitent le problème continu avec une heuristique dans le but de minimiser le temps de service total de navires, lorsque le temps de traitement d'un navire dépend de l'emplacement de quai qui lui est assigné. Les tests sont effectués avec des quais jusqu'à 1600m et jusqu'à 60 navires. [Cordeau et al, 2005] prennent en compte à la fois le discret et le continu. Deux formulations et deux heuristiques de recherche tabou sont présentées et testées sur des instances réelles (jusqu'à 35 navires), suivies par une analyse statistique des données d'allocation de quai du port de Gioia Tauro (Italie).

2.1.2 Arrimage de conteneurs

Lorsqu'un navire arrive au port, il doit s'amarrer au quai. Le nombre de quais qui devraient être disponibles est l'une des décisions qui doit être prise. L'arrimage d'un porte-conteneurs est un problème fortement contraint, dans lequel les gestionnaires de terminaux n'ont pas le pouvoir de décision totale. Par exemple, les plans de chargement/déchargement sont établis par le capitaine du navire. En général, un navire fait escale dans un ou plusieurs ports où les conteneurs seront chargés et déchargés. Ceci implique l'élaboration d'un plan de chargement/déchargement afin de prendre en compte l'ordre des conteneurs destinés à des ports successifs. Le problème d'arrimage de conteneurs consiste à affecter les conteneurs à des positions dans le navire en assurant sa stabilité et en minimisant le nombre de mouvements improductifs sachant que les conteneurs lourds sont généralement stockés sur la première couche de la pile dans le navire et les conteneurs légers sont empilés au-dessus [Kim et al, 2000]. [Imai et al, 1997] présentent une méthode multicritère d'optimisation pour le problème d'arrimage du navire qui prend en compte deux objectifs opposés : la stabilité du navire et le nombre de conteneurs en mouvements de chargement/déchargement. Les auteurs proposent un modèle de programmation multi-objectif en nombre entier et mettent en œuvre une méthode de pondération pour arriver à un programme à objectif unique. L'approche a été appliquée à des instances contenant jusqu'à 504 conteneurs. Selon [Wilson et Roach, 2000], le problème de chargement de conteneurs est un problème, dont la taille dépend de la capacité du navire et de l'offre et de la demande des conteneurs au niveau de chaque port.

2.1.3. Ordonnancement des grues de quais

Les opérations de chargement et de déchargement des navires nécessitent des grues de quai qui sont très coûteuses. Le problème d'ordonnancement des grues de quai se réfère à l'allocation d'un nombre fixe des grues de quai aux tâches ainsi qu'à l'ordonnancement des mouvements de chargement et de déchargement. En effet, l'affectation des navires aux postes à quai nécessite de prendre en compte l'affectation des grues de quai aux navires, car le nombre de grues affectées à un navire influence directement le temps de séjour du navire. Le problème étudié dans [Bish, 2003] consiste à déterminer un emplacement de stockage pour chaque conteneur déchargé et assurer le routage des cavaliers afin de transporter les conteneurs du navire vers la zone de stockage. L'objectif était de minimiser le temps maximum pour servir l'ensemble des navires. [Lim, 2005] traitent le problème d'affectation des grues aux tâches sous les contraintes de non croisement, de voisinage et de séparation. Les

auteurs proposent un algorithme de programmation dynamique et un algorithme de recherche tabou probabiliste. Ils ont testé ces algorithmes sur des instances générées (de taille dépassant 30 grues et 40 tâches) reflétant la situation du Port de Singapour. [Sammarra et al, 2007] ont décomposé le problème en un problème de routage et un problème d'ordonnancement et ils ont proposé un algorithme de recherche tabou pour le problème de routage qui est intégré dans une procédure de recherche locale pour le problème d'ordonnancement. Ils ont comparé leurs résultats avec ceux de [Moccia et al, 2006]. L'algorithme proposé par [Sammarra et al, 2007] s'est avéré capable de trouver l'optimum pour plusieurs instances dans un laps de temps raisonnable.

2.2. Problèmes liés à la cour

Le management des opérations de la cour comporte plusieurs problèmes de décision, comme le design des politiques de stockage dans les blocs de conteneurs et au niveau des baies suivant les caractéristiques spécifiques d'un conteneur (taille, poids, destination, import/export, etc.), l'allocation, le routage et l'ordonnancement des principaux équipements de manutention qui sont les grues à quai, les grues de cour et les cavaliers qui impactent directement la performance d'un terminal.

2.2.1. Ordonnancement des grues de la zone de stockage

Les opérations de chargement, de déchargement et de stockage des conteneurs sont assurées par des grues de cour, Figure III.3 (yard crane (YC)). Ce sont des équipements de manutention installés sur les différents blocs de la zone de stockage.



Figure III.3. Portique de parc

Pour fluidifier la manutention des navires et améliorer la performance du terminal à conteneurs, il est essentiel de focaliser sur l'ordonnancement des YCs. [Lee et al, 2006]

présentent le problème de gestion de la cour de stockage dans un hub de transbordement. L'objectif est la réduction de la congestion du trafic. Les auteurs visent l'affectation des conteneurs aux blocs de la zone de stockage ainsi que l'affectation des grues de manutention aux blocs et proposent un modèle de programmation linéaire mixte qui minimise le nombre des grues nécessaires pour la réalisation des travaux de chargement. Deux heuristiques sont proposées et testées sur des instances générées aléatoirement : une méthode séquentielle et un algorithme de génération de colonnes.

2.2.2. Problème de Stockage de Conteneurs

La zone de stockage est une zone tampon constituée par plusieurs blocs. Elle sert à stocker les conteneurs qui transitent par le terminal. La plupart des terminaux visent à mieux gérer la capacité limite de leurs terrains. Il est donc impératif de mieux exploiter les ressources et de bien gérer leurs espaces de stockage. Ce problème consiste à l'allocation des emplacements pour le stockage des conteneurs dans un bloc. L'objectif est de minimiser les coûts liés aux mouvements improductifs causés par un mauvais empilement de conteneurs. Ceci a un effet considérable sur les temps de séjour des navires, car les navires restent inactifs à quai pendant la durée de manutention. [Zhang et al, 2003] ont développé un modèle en nombres entiers concernant le problème d'allocation de l'espace de stockage pour le port de Hong Kong. Pour cela, ils ont décomposé le problème à deux niveaux : d'une part, il s'agit de déterminer le nombre de conteneurs associés à chaque bloc de stockage et d'autre part, déterminer le nombre de conteneurs de chaque navire affecté à chaque bloc de stockage.

2.2.3. Ordonnancement des véhicules de transfert interne des conteneurs

Les conteneurs sont transportés par les véhicules à partir des postes à quai vers les blocs de la zone de stockage. L'optimisation des activités de cette phase joue un rôle très important sur l'optimisation de l'ensemble de la chaîne de manutention. [Vis et de Koster, 2003] proposent d'utiliser des zones tampons dans le transfert Quai-Cour, de sorte que le processus peut être dissocié en deux sous-processus : le déchargement et le transport. Un modèle de programmation en nombres entiers détermine la taille minimale de la flotte de telle sorte que chaque conteneur est transporté à l'intérieur de sa fenêtre de temps. Les résultats d'analyse sont validés par simulation, les expériences numériques montrent que le modèle fournit une bonne estimation du nombre de véhicules nécessaires.

3. APPROCHES DE RÉOLUTION

Après avoir présenté les problématiques portuaires connues dans la littérature, nous allons présenter des approches de modélisation et de résolution en nous focalisant sur les approches d'optimisation mathématique et de simulation.

Ensuite, afin de préciser et de comprendre le fonctionnement des différents processus de la chaîne de manutention, nous présentons une revue de littérature sur les méthodes de modélisation des processus portuaires. Notre objectif consiste à concevoir un système de simulation permettant de proposer et de tester des modes d'exploitation pour le transfert et la manutention de conteneurs entre le terminal multimodal et les terminaux maritimes du port du Havre.

3.1. Optimisation mathématique

L'objectif de cette approche est optimiser un ou plusieurs critères [Dreo et al, 2003] tout en satisfaisant un ensemble de contraintes [Christos et al, 1998]. Face à un problème d'optimisation, l'enjeu principal est de choisir une méthode performante. Elle doit être efficace et capable de fournir des solutions optimales en un temps raisonnable. Dans la littérature, on distingue principalement deux grandes classes de méthodes : les méthodes exactes et les méthodes approchées ou métaheuristiques (Figure III.4).

Les méthodes exactes permettent de trouver des solutions optimales mais elles sont généralement utilisées pour résoudre des problèmes de petite taille. Cependant, dans le cas des problèmes de grande taille, les métaheuristiques sont souvent utilisées. Ces dernières méthodes fournissent des solutions réalisables en un temps réduit [Dolgui et Proth, 2006], [Dhaens, 2005].

Parmi les métaheuristiques les plus connues, on peut citer les algorithmes évolutionnistes comme : les stratégies d'évolution, les algorithmes génétiques, les algorithmes à évolution différentielle, les algorithmes à estimation de distribution, les systèmes immunitaires artificiels, la recombinaison de chemin (Pathrelinking en anglais), le recuit simulé, les algorithmes de colonies de fourmis, les algorithmes d'optimisation par essaims particuliers, la recherche avec tabou et la méthode GRASP [Dolgui et Proth, 2006].

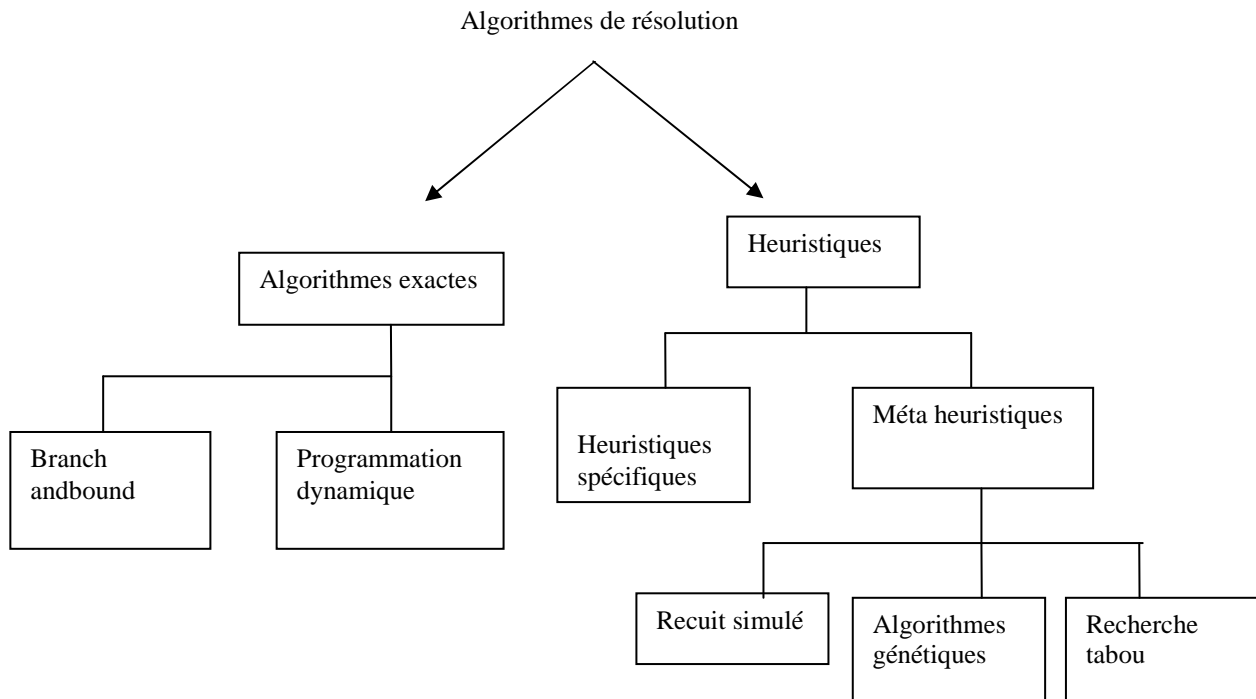


Figure III.4. Classification des méthodes d'optimisation

Il existe aussi plusieurs métaheuristiques [Christos et al, 1998], plus ou moins connues, tels que, l'algorithme du kangourou, la méthode de Fletcher et Powell, la méthode du bruitage, l'escalade de collines à recommencements aléatoires et la méthode de l'entropie croisée.

La recherche dans ce domaine est très active, il est impossible de définir une liste exhaustive des différentes métaheuristiques d'optimisation. La littérature montre un grand nombre de variantes entre méthodes, particulièrement dans le cas des algorithmes évolutionnaires.

Les outils d'optimisation ont été largement appliqués pour chercher des solutions aux problèmes qui se posent au niveau des terminaux à conteneurs. Dans [Kemme, 2012], on donne une classification des problèmes de planification des terminaux en fonction des quatre zones (voir chapitre 2). De nombreuses techniques d'optimisation [Kemme, 2012] sont appliquées pour la gestion d'un terminal à conteneurs selon les trois niveaux de décision (stratégique, tactique et opérationnel), principalement les méthodes exactes et les métaheuristiques. Les travaux [Moccia et al, 2006 ; Sammarra et al, 2007 ; Hartmann, 2005], traitent des problèmes spécifiques tels que l'ordonnancement d'un type d'équipement, l'affectation des navires aux quais ou l'affectation des espaces de stockage. [Zehendner et al, 2011] déterminent une affectation de ressources optimisée qui minimise les délais des modes de transport terrestre tout en respectant les délais imposés des navires. [Hartmann, 2005] a

développé un algorithme génétique afin de proposer un ordonnancement des tâches pour les chariots cavaliers, les Véhicules Guidés Automatisés (AGV), les grues d'empilage et les travailleurs. Le but est de minimiser les retards moyens des différentes tâches concernant la manutention dans le port de Hambourg.

3.2. Simulation

Selon [Drogoul, 1993] : « *On nomme simulation la démarche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, appelée modèle, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues. La démarche de simulation passe donc par trois étapes distinctes: l'étape de modélisation, qui consiste à construire le modèle du phénomène à étudier, l'étape d'expérimentation, qui consiste à soumettre ce modèle à un certain type de variations, et l'étape de validation, qui consiste à confronter les données expérimentales obtenues avec le modèle à la réalité.* »

La simulation de flux est aujourd'hui un outil largement utilisé pour concevoir un modèle représentant un système réel. Le développement de la chaîne logistique apporte de nouvelles applications pour la simulation de flux. Longtemps utilisée pour concevoir ou reconcevoir des unités de production, la simulation est aussi utilisée aujourd'hui comme outil d'aide à la conduite de systèmes de production.

La simulation est le développement d'expériences sur un modèle. Elle permet la représentation d'un système réel, en vue d'évaluer ses performances et les propriétés de son comportement. Par ailleurs la simulation peut être utilisée pour dimensionner un système, améliorer le taux d'utilisation des équipements et aussi démontrer le potentiel de l'installation d'un nouvel équipement [Armando et Stefano, 2012]. Les approches de simulation permettent la modélisation dynamique des comportements de l'entreprise, avec des degrés variés de contraintes et des politiques différentes. Elles peuvent traiter les diverses contingences occasionnées par les incertitudes, par exemple, de l'approvisionnement et de la demande. Elles ne peuvent pas générer une solution par elles-mêmes, elles peuvent seulement exécuter les modèles selon des paramètres et des conditions pré spécifiées. En général elles sont utilisées pour évaluer et comparer des scénarios possibles. La conduite d'une simulation nécessite de suivre les étapes suivantes [Figure III.5] :

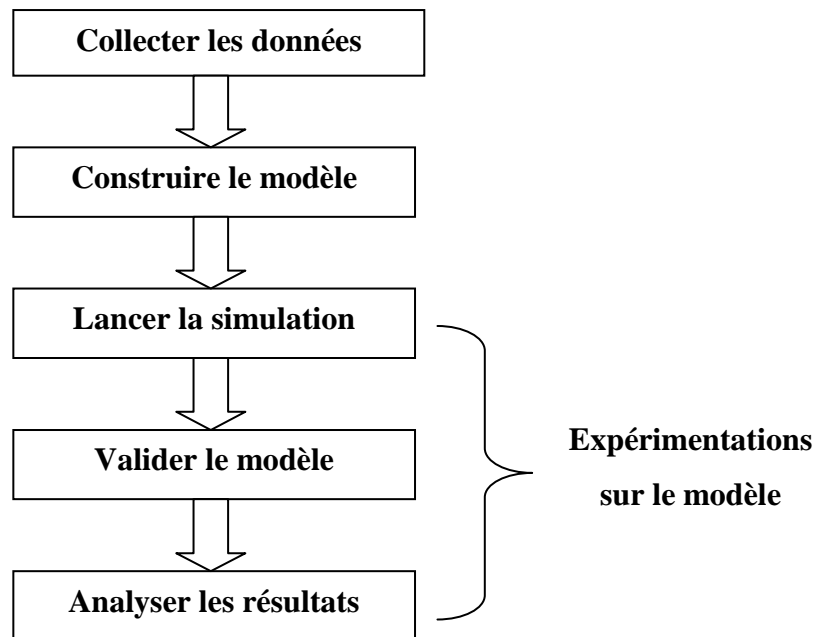


Figure III.5. Les étapes nécessaires pour la conduite d’une simulation (Source [Drogoul, 1993])

1) Analyser et modéliser le système étudié : la simulation consiste à construire un modèle à partir d’un système réel et à réaliser des expériences sur ce modèle afin de tester son fonctionnement et d’évaluer ses performances. Pour ceci, une première modélisation est indispensable afin de préciser les processus à simuler, d’exprimer les différentes relations et interactions entre ces processus, les liens du futur système avec l’environnement et les systèmes existants et ainsi les différents acteurs impliqués dans les différentes activités.

2) Construire le modèle de simulation : le développement d’un simulateur peut se faire soit par l’utilisation d’un langage de simulation (ARENA, Flexsim, Anylogic) ou l’utilisation d’un langage de programmation.

3) Mettre en œuvre le modèle de simulation : cette phase est le résultat des étapes précédentes. Il s’agit de lancer la simulation du modèle réalisé afin d’obtenir les résultats spécifiés. L’objectif principal de cette phase est de tester plusieurs scénarios pour analyser et évaluer la performance du système étudié.

4) Valider le modèle de simulation : la validation d’un modèle de simulation joue un rôle très important, car elle permet aux exploitants de faire confiance aux résultats des simulations. L’objectif principal du processus de validation est de s’assurer que les hypothèses et la modélisation du système réel sont raisonnables et correctement mises en œuvre.

Il existe différents types de simulation, à savoir, la simulation à événements discrets, la simulation continue et la simulation multi-agent.

3.2.1. La simulation à événements discrets et simulation continue

Au mois d'octobre 1961, Geoffrey, ingénieur chez IBM a présenté la première version de GPSS (General Purpose Simulation System), qui est considérée comme la première méthode de mise en œuvre du logiciel de modélisation à événements discrets [Andrei, 2013]. Dans une simulation à événements discrets, le système étudié change d'état suite à l'arrivée d'un ou de plusieurs événements. La simulation à événements discrets permet de décrire des systèmes dont l'état change à des instants précis [Xiaojun, 1994]. Une de ses limites est due à son principe qui consiste à décrire les changements d'état par des algorithmes et de définir pour chaque événement des contraintes de précédence entre les activités.

Quant à la simulation continue où le système se présente sous forme d'équations différentielles, elle permet de modéliser un système évoluant au cours du temps, représenté par des variables d'état qui évoluent dans le temps. La méthode des systèmes dynamiques est créée au milieu des années 1950 par le professeur Jay Forrester. L'idée de Forrester était d'utiliser les lois de la physique, en particulier les lois de circuits électriques, pour décrire et étudier la dynamique des systèmes économiques et, plus tard, les systèmes sociaux. Les principes et le langage de modélisation de la dynamique du système ont été développés dans les années 1950 et au début des années 1960, et demeurent inchangés aujourd'hui [Andrei, 2013].

Il existe plusieurs approches pour modéliser les systèmes à événements discrets [Xiaojun, 1994] à savoir : Approche par événements, Approche par cycle d'activités, Approche par processus et Approche par objets. Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'approche objets.

La simulation orientée objet

Les phases d'analyse et de conception dans un processus du développement d'un projet sont deux phases essentielles et primordiales, pour cela le choix de l'approche et de la méthode à suivre par rapport au type du système ou bien du problème à modéliser est fondamental. L'approche par objet consiste à modéliser le système par un ensemble d'entités qui interagissent entre eux par envoi de messages [Won et Yong, 1999]. Grâce à ses propriétés de réutilisabilité, de localité des données et de sa capacité d'intégration des

informations l'objet doit utiliser l'ensemble de ces caractéristiques pour répondre aux attentes du concepteur.

La conduite d'une simulation objet nécessite une analyse du système afin de le décomposer en un certain nombre d'objets. En effet, ces objets doivent avoir des attributs et des opérations. Ensuite, il convient de décrire ces objets, leurs attributs et l'interaction entre eux.

Pour faire face à la complexité croissante des systèmes de fonctionnement des entreprises, de nouvelles méthodes et outils ont été créés. La principale avancée de ces dernières années réside dans la programmation orientée objet (P.O.O.). Face à ce nouveau mode de programmation, les méthodes de modélisation classique (Exemple : MERISE) ont rapidement montré certaines limites et ont dû s'adapter.

C'est ainsi qu'est apparu UML (Unified Modeling Language « langage de modélisation unifié ») [Gabay et Gabay., 2008]. C'est un langage graphique de modélisation objet des données. C'est une formalisation non propriétaire utilisée en génie logiciel. UML est un langage pour visualiser, spécifier, concevoir et documenter les artefacts d'un système à base logicielle. Il permet de décrire le système dans son environnement et il offre une vue complète des aspects statiques et dynamiques du système. Les processus du système étudié seront formalisés sous forme d'use-case d'activité et de diagramme de séquence ensuite le comportement général du système sera décrit sous le diagramme de classe.

3.2.2. La simulation Multi Agent

La simulation Multi Agent est une méthode de modélisation plus récente que les systèmes dynamiques ou la modélisation à événements discrets [Andrei, 2013]. Un système multi-agents est un système constitué d'un ensemble d'agents, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations. Selon [Ferber 95] : « *Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents* ».

En effet, un agent est défini comme une entité. Il est caractérisé par un état et un comportement tout comme l'objet. Deux notions importantes sont abordées dans cette définition. D'une part, l'autonomie permettant à un agent le contrôle de son comportement

sans l'intervention d'autres agents ou d'êtres humains. D'autre part, la capacité d'un agent à communiquer avec d'autres agents.

Donc, un système multi-agents est composé d'agents autonomes et leur principe consiste à coopérer et à communiquer afin d'atteindre un objectif avec les meilleures performances.

3.3. Choix de l'approche de résolution

Selon [Ung et Masanobu, 2009], la simulation est le meilleur outil utilisé pour représenter n'importe quel système du monde réel. Elle est souvent utilisée pour l'analyse des systèmes complexes. La plupart des modèles de simulation sont basés sur la simulation à événements discrets [Armando et Stefano, 2012]. Ce type de simulation permet de dépasser les limites des approches mathématiques d'optimisation et d'aider à répondre à la question « what if ... ? ».

La simulation permet la représentation d'un système réel, en vue d'évaluer ses performances et les propriétés de son comportement. Par ailleurs, la simulation peut être utilisée pour dimensionner un système, améliorer le taux d'utilisation des équipements et aussi démontrer le potentiel de l'installation d'un nouvel équipement. Les approches basées sur la simulation permettent la modélisation dynamique des comportements de l'entreprise, avec des degrés variés de contraintes et des politiques différentes. Elles peuvent traiter les diverses possibilités occasionnées par les incertitudes. Néanmoins, la simulation ne peut pas générer une solution optimale par elle-même, mais seulement exécuter les modèles selon des paramètres et des conditions pré spécifiées. En général elle est utilisée pour évaluer et comparer des scénarios possibles. [Persson et Araldi, 2009] affirment que la simulation permet de prendre en compte la dynamique des systèmes, de faciliter la modélisation et de capturer les incertitudes et les complexités de la chaîne logistique. Une approche modulaire a été proposée par [Yuh et Yuh, 2007] pour modéliser et simuler la chaîne logistique en prenant en compte le système de communication, d'information et de connaissance. Dans le domaine portuaire, la simulation a été largement utilisée pour étudier les processus de manutention dans les terminaux à conteneurs. L'objectif de [Ung et Masanobu, 2009] est d'estimer les effets des séismes sur la performance du système d'exploitation du terminal. L'indicateur de performance majeur considéré est le pourcentage de la perte économique lorsqu'un séisme se produit ; ceci se traduit par la diminution du trafic de conteneurs. Dans [Won et Yong, 1999], un modèle de simulation SIMPLE++ analyse le fonctionnement du terminal à conteneurs de

Pusan, en Corée, par rapport aux indicateurs de performance : taux d'occupation des engins de manutention et le taux d'occupation de la zone de stockage. [Kia et al, 2002] utilisent la simulation pour comparer statistiquement deux différents systèmes opérationnels et proposent une solution pour réduire la congestion du terminal et augmenter sa capacité. Le modèle de simulation de [Nam et al, 2002] détermine la taille optimale en termes de postes à quai et de grues de quai pour un terminal à conteneurs. Un autre modèle de simulation [Lee et al, 2003] a été développé pour évaluer les opérations portuaires dans une chaîne d'approvisionnement. [Zeng et Yang, 2009] ont proposé un modèle pour simuler l'ordonnancement des opérations de manutention dans les terminaux à conteneurs. L'objectif de [Bielli et al, 2006] est l'évaluation des opérations de chargement et de déchargement des navires en fonction du temps et du coût. Ils ont également évalué plusieurs politiques de stockage et différentes procédures d'allocation des ressources en se basant sur des résultats fournis par les algorithmes d'optimisation. [Khosnevis et al, 2000] ont étudié l'impact de l'utilisation des véhicules automatisés sur la performance des opérations de chargement et de déchargement au niveau des zones de stockage de conteneurs.

La simulation permet de décrire le fonctionnement d'un système sans pour autant générer une solution optimale. Par contre, l'optimisation fournit une solution optimale sans décrire totalement le fonctionnement du système [Armando et Stefano, 2012].

Pour tirer profit simultanément des deux approches, plusieurs travaux proposent des couplages entre les deux approches. Ainsi une approche d'optimisation [Better et Glover, 2008] a été intégrée dans la simulation pour prendre en compte des risques et des incertitudes. Le couplage de l'optimisation et la simulation [Almeder et al, 2009] visent à déterminer les variables de décision de la simulation en utilisant l'optimisation. Les résultats de la simulation (les coûts, les délais de production et de transport) alimentent l'optimisation, qui en retour détermine les variables de décision de la simulation et ainsi de suite. [Cordeau et al, 2015] intègrent la simulation dans une heuristique de recherche locale afin de gérer le routage des chariots cavaliers dans un terminal à conteneurs en minimisant les distances parcourues et de réduire les temps d'attente. Dans notre cas [Benghalia et al, 2014], nous avons couplé le modèle de simulation avec l'optimisation afin de déterminer les variables de décision de la simulation du transfert ferroviaire de conteneurs et de valider les différents choix fonctionnels (nombre de locomotives, nombre de wagons, ordonnancement de trajets). Ce dernier travail est présenté dans le chapitre six.

4.CONCLUSION

Nous avons décrit les opérations concernant le fonctionnement d'un terminal à conteneurs. Le chapitre fait état d'une synthèse sur les différents problèmes portuaires connus dans la littérature à savoir les problèmes liés à la zone à quai et les problèmes liés à la zone à cour. Ces problèmes sont donc répartis sur les deux zones constituant un terminal à conteneurs.

Dans une deuxième partie, nous avons présenté des approches de résolution courantes pour les problèmes des terminaux à conteneurs. Chaque approche a une vision différente. Il s'agit des approches : par optimisation, simulation ainsi que le couplage optimisation et simulation.

Dans le chapitre suivant nous allons nous concentrer sur les systèmes de mesure de performance des chaînes logistiques. Nous présenterons ainsi un aperçu sur les méthodes de définition et d'implantation d'indicateurs de performance les plus connues afin de préciser notre démarche retenue.

CHAPITRE IV : ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ET CONTRIBUTION

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	62
2. REVUE DE LITTÉRATURE	62
2.1. La notion de performance	63
2.2. Rôle et importance des indicateurs de performance.....	63
2.3. Mesure de performance	66
2.4. Évaluation de la performance.....	68
3. MÉTHODES POUR LA MESURE ET L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE.....	70
3.1. Triplet efficacité / efficience / pertinence	70
3.2. La méthode ABC/ABM (L'Activity Based Costing et l'Activity Based Management)	70
3.3. Le modèle BSC : Balanced ScoreCard	71
3.4. Le modèle SCOR : Supply Chain Operation Reference modele	71
3.5. La méthode ECOGRAI	73
3.5.1. La méthode GRAI (Graphe à Résultats et Activités Inter-reliés)	74
4. NOTRE DÉMARCHE ECOGRAISIM	75
4.1. Limites d'ECOGRAI et contribution.....	78
5. CONCLUSION	79

1. INTRODUCTION

La complexité croissante et les différentes entités impliquées dans le fonctionnement d'un terminal à conteneurs [Henesey, 2006], nécessitent une amélioration continue de ses performances, notamment en raison des coûts associés et de l'impact sur les capacités de manutention de conteneurs. En effet, une seule mesure de performance n'est pas suffisante, aujourd'hui, les industriels ne se limitent plus aux simples notions de productivité ou de qualité produit, ils orientent leurs stratégies en direction de la satisfaction des clients tout en maîtrisant l'aspect environnemental et en assurant un niveau de sécurité et de sûreté de fonctionnement [Jacot, 1990]. L'évaluation des critères de performance, notre objectif d'étude, fait l'objet de plusieurs travaux de recherches dans différents domaines.

L'un des principaux objectifs de cette thèse consiste à étudier et à développer une démarche pour modéliser et évaluer la performance des terminaux à conteneurs. En effet, dans le chapitre précédent, nous avons orienté notre choix d'approche vers le couplage entre l'optimisation et la simulation afin de proposer et d'étudier des modes de transfert de conteneurs entre les terminaux à conteneurs du port du Havre.

Dans ce chapitre, notre objectif consiste à proposer une démarche permettant de déterminer les indicateurs de performance à mesurer. Tout d'abord, un bilan bibliographique sur la performance et sur les outils d'évaluation de celle-ci sera présenté. Ensuite, une démarche d'aide à la détermination des indicateurs de performance, ECOGRAISIM, a été proposée pour le pilotage des chaînes logistiques portuaires. Dans le chapitre suivant, nous déployons cette proposition sur un cas industriel réel ; il s'agit de modéliser la structure de pilotage générale du futur terminal multimodal et d'évaluer la performance de ses processus de manutention et de transfert de conteneurs maritimes.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Pour être en mesure, par la suite, de proposer une démarche d'évaluation de performance, nous abordons dans un premier temps les différentes notions et concepts de la performance à savoir les notions : d'indicateur de performance, de mesure de performance et d'évaluation de la performance. Ensuite, nous présentons les méthodes de développements et d'évaluation des indicateurs de performance et nous terminons par une synthèse générale détaillant le choix de notre démarche.

2.1. La notion de performance

De nombreux recherches ont pour objet d'étude l'évaluation de la performance. Chacune propose une définition selon le domaine de son étude et les objectifs qui orientent son analyse. Le mot performance signifiait accomplissement, réalisation et résultats réels. Selon Larousse, la performance peut être définie comme un record ou un succès, « Faire un tel travail en si peu de temps, c'est une véritable performance ». La notion de performance peut être interprétée différemment d'un domaine à un autre. Le centre national de ressources textuelles et lexicales [CNRTL] propose les définitions suivantes : dans le domaine sportif, la performance indique le résultat obtenu par un athlète. En psychologie, c'est un test non verbal permettant l'estimation de l'intelligence réelle de l'être humain. [Le mestre, 2004] affirme que la performance désigne les résultats d'une action ou d'un fonctionnement qui seront par la suite comparés à un référent. Dans le domaine industriel, une unité de production performante signifie que ses processus sont optimisés, la production se déroule au bon moment et au moindre coût. En outre, améliorer la performance en entreprise n'implique pas forcément la minimisation des coûts ou la maximisation de la production. Il s'agit plutôt d'une performance multicritères [Humez, 2008] où il faut considérer plusieurs indicateurs afin de sélectionner les meilleures combinaisons. Dans le domaine portuaire, les critères à évaluer au sein d'un terminal à conteneurs sont liés directement aux coûts d'investissement et à la productivité. Dotés ainsi d'un important poids en terme de coûts dans la chaîne logistique, les terminaux à conteneurs pour ne pas se voir marginaliser, doivent s'efforcer d'assurer quotidiennement la fluidité des flux informationnels et physiques.

La notion de performance donc est complexe [Voyer, 2006]. Elle est multicritère et s'articule autour de plusieurs enjeux à savoir le coût, l'amélioration continue, la qualité de service, les délais et la qualité de vie au travail. En effet, le degré de performance d'une entreprise compétitive est déterminé en fonction de sa capacité à réagir face à des situations et à des perturbations probables, il est aussi lié à sa capacité à apporter de nouvelles solutions d'innovation ou à améliorer une solution existante.

2.2. Rôle et importance des indicateurs de performance

Un indicateur de performance est considéré comme une variable quantifiée pertinente pour la prise de décision et le pilotage [Beaudry]. Il permet également l'évaluation des résultats obtenus après l'exécution des tâches. Pour le secteur de la logistique, l'ensemble d'indicateurs de performance a pour objectif l'évaluation de l'efficacité et de la viabilité du

système et concerne tous les niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Plusieurs définitions de la notion d'indicateur de performance ont été données dans la littérature.

- D'après [Lorino, 1996], un indicateur de performance permet d' « aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'évaluer le résultat ».
- La notion d'indicateur de performance représente d'une part une donnée permettant d'aider un décideur ou un groupe à effectuer les choix nécessaires pour atteindre les objectifs fixés. D'autre part, il est considéré comme une donnée qui permet d'indiquer l'efficacité par rapport à un objectif ou à une norme déterminée.

Dans le domaine portuaire, la liste des indicateurs de performance permet de contrôler la mise en œuvre des règles de gestion et d'explorer les améliorations possibles. Elle n'est jamais définitive car elle est liée aux besoins des utilisateurs où les objectifs ont une influence sur les indicateurs de performance. Les indicateurs de performance doivent être de type SMART (S : spécifique, M : mesurable, A : Atteignable, R : Raisonnable, T : temporel) ou encore appelé indicateurs de performance intelligents [Beaudry].

Deux types d'indicateurs de performance sont considérés dans [Beaudry], indicateurs de type résultat permettant de savoir si l'objectif fixé est atteint ou non et indicateurs de type processus. Ce dernier type permet d'avoir des informations concernant un processus précis. Par exemple, un indicateur qui permet de connaître le taux de manutention des conteneurs par heure dans un terminal et si une baisse se produit, ceci conduira à chercher les causes afin de prendre des décisions nécessaires.

Dans [Gaugris, 2008] les indicateurs de performance sont classés en trois types : taux de croissance, ratios et indicateurs de contribution. [Chan, 2003] considère les indicateurs quantitatifs et les indicateurs qualitatifs.

Indicateurs quantitatifs : concernent le nombre et le pourcentage d'objets impliqués dans le fonctionnement de l'organisation étudiée. Dans cette catégorie, nous pouvons distinguer :

- des indicateurs liés aux différentes opérations [Zhao et Xie, 2002] de stockage, de transport, etc.
- des indicateurs financiers [Chu et Lee, 2006] tels que le taux de rendement, le revenu, le profit et le prix de vente.

Les indicateurs qualitatifs sont d'une importance incontournable. Il n'est pas suffisant de savoir qu'un tel objet participe à une activité, c'est la qualité de sa participation et par conséquent la qualité de service qui est de la plus haute importance, par exemple, le taux de satisfaction des clients et le taux de service.

Dans le domaine portuaire, afin d'assurer une gestion rentable d'un port ; pour l'ensemble des processus liés par la manutention, chaque terminal doit maîtriser ses coûts et ses stratégies de gestion. En effet les indicateurs concernant les coûts de manutention, les dépenses générales et les montants de rendement doivent être définis et calculés. Ces indicateurs sont de type financiers parce qu'ils seront utilisés directement par le service de comptabilité au sein du port. L'indicateur principal est celui qui exprime le rendement concernant le volume de conteneurs manutentionnés.

Les indicateurs opérationnels : permettent aux décideurs la planification et le suivi à moyen terme. Pour des raisons de complexité et du nombre important d'acteurs assurant le fonctionnement d'un terminal, une seule mesure de performance ne peut être suffisante. Les indicateurs les plus utilisés sont : le nombre d'arrivées de navires et leur temps de séjour dans le quai ainsi le nombre de conteneurs manutentionnés par heure quand le navire est à quai.

La performance environnementale appelée aussi performance écologique est aujourd'hui largement prise en compte par les acteurs portuaires. L'enjeu consiste à la protection de la terre, l'air et l'eau en contrôlant [Merk et al, 2011]:

- les différentes émissions à savoir le volume de gaz à effet de serre, les oxydes de soufre (S_{ox}), etc.
- la consommation d'eau et la production de déchets.

D'après [Merk et al, 2011], les données sur la qualité de l'air communiquées par le port du Havre, montrent que :

- 17% des émissions de NO_x et 10% des émissions de SO₂ dans l'agglomération du Havre étaient liées aux transports maritime et fluvial.
- La grande partie des émissions (environ 70% pour le CO₂ et les NO_x, et 85% pour le SO₂) est liée aux secteurs touchant à l'énergie présents dans la zone portuaire.

Pour faire face, plusieurs éléments peuvent être considérés tels que :

- la qualité des carburants ;
- l'utilisation de l'électricité;

- la limitation de la consommation d'énergie;
- la répartition modale et le développement de la multimodalité;
- la réduction des poussières causées par la manutention des charbons, céréales, etc.

La performance sociale, quant à elle, son objectif consiste à gérer les différents conflits sociaux [Frédouët et Le Mestre; 2005]. Dans le domaine portuaire, il s'agit d'améliorer les conditions générales de travail au sein du réseau portuaire (gérer les nuisances sonores, limiter certaines activités la nuit et le weekend, etc.).

Il existe une variété d'indicateurs de performance de la chaîne logistique [Berrah, 2002]. Il n'y a pas un ensemble précis d'indicateurs valables pour toutes les chaînes logistiques. L'ensemble des indicateurs choisis doit dépendre de la nature des activités réalisées par la chaîne [Mouloua, 2007]. En revanche, prendre trop d'indicateurs dans un environnement complexe peut rendre la gestion difficile en n'ayant pas assez de visibilité sur les décisions qu'il faut prendre. Néanmoins, prendre peu d'indicateurs ne serait pas suffisant pour évaluer la performance. L'enjeu principal donc est de déterminer l'ensemble de bons indicateurs et de les accompagner par une démarche permettant la conduite d'une évaluation de performance.

2.3. Mesure de performance

« If you can not measure it, you can not improve it » est une citation parmi les citations du physicien britannique William Thomson [Kelvin]. Il est indispensable de mesurer les performances d'une entreprise pour savoir si sa politique correspond aux objectifs ou si un ou des changement (s) sont à envisager afin de rester opérationnelle [Beamon et Chen, 2001]. Pour mettre en place un système de mesure de la performance, plusieurs éléments sont à prendre en considération à savoir ce qu'il faut mesurer et à quel niveau décisionnel il faut mesurer. Dans le domaine portuaire et comme dans tous les autres domaines, la mesure de la performance est indispensable.[Franco et al, 2007] décrivent les intérêts attendus d'un système de mesure de performance pour une entreprise ou une organisation. Il s'agit de :

- poursuivre les progrès atteints et d'évaluer leur gain présent ;
- savoir si le processus de planification répond aux exigences stratégiques ;
- analyser le comportement actuel de l'entreprise pour mieux contrôler son comportement futur.

La mesure de performance conduit à apporter continuellement des modifications pour l'atteinte des objectifs. Les travaux menant à la définition des méthodes d'identification des

indicateurs et de mesure de performance sont apparus au cours du vingtième siècle(Figure IV.1).

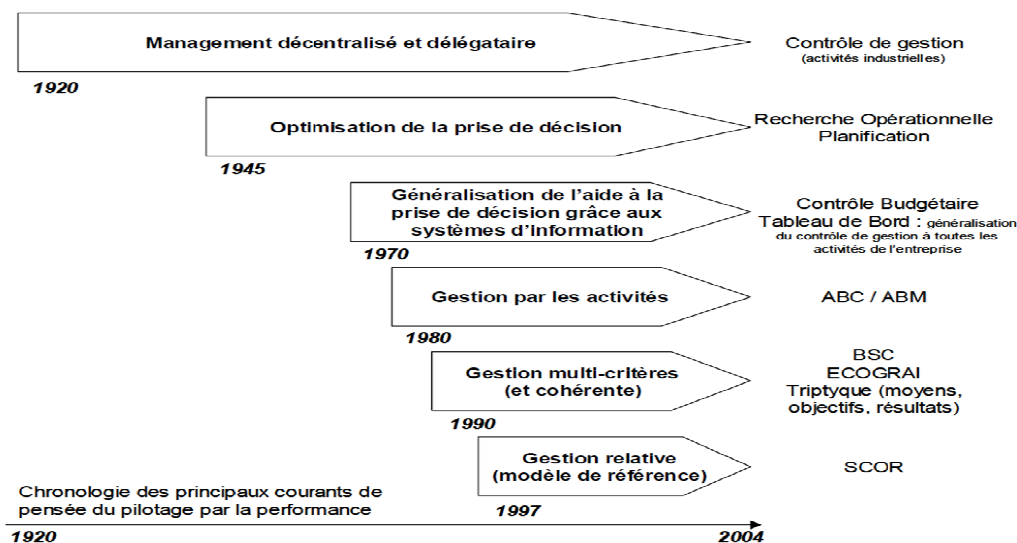


Figure IV.1. Chronologie des principales démarches pour le pilotage par la performance (Source [Matthieu Lauras, 2004])

C'est à partir des années 1980 que les entreprises ont commencé à s'intéresser à l'amélioration de la qualité et aux différents contrôles budgétaires en réalisant les premiers tableaux de bord permettant un début du pilotage de la performance. Des méthodes comme l'Activity Based Costing (ABC) puis l'Activity Based Management (ABM) dont l'objectif est la gestion par activités, ont été développées [Matthieu Lauras, 2004].

Les premiers travaux qui définissent les méthodes d'identification des indicateurs et de mesure de performance sont apparus au début des années 90 [Vincent, 2005]. Parmi ces méthodes on peut citer : FLR (Framework for Logistics Research), BSC (Balanced ScoreCard), WCL (World Class Logistics Model), APICS (Association for Operations Management), le modèle SCOR (Supply Chain Opérations Référence), ECR (Efficient Customer Response). Aux Etats-Unis, R.S. Kaplan et D.P. Norton développent le principe du Balanced ScoreCard autour de quatre dimensions : finances, clients, processus et apprentissage. En France, [Bitton, 1990] crée la méthode ECOGRAI permettant de développer des Systèmes d'Indicateurs de Performance (SIP) en déterminant les objectifs et les variables de décision.

Le principe de ces méthodes consiste à la modélisation des processus de l'entreprise étudiée. Les objectifs et les indicateurs liés sont souvent déterminés par rapport à des facteurs de performances [Ducq, 2007]. La modélisation du système à piloter est une nécessité afin de

décomposer toute la structure organisationnelle et de gérer les interactions entre les activités pour atteindre les objectifs [Bitton, 1990].

2.4. Évaluation de la performance

La question principale n'est souvent pas de savoir s'il faut améliorer la performance, mais plutôt comment le faire et comment procéder. En effet, l'évaluation de la performance repose essentiellement sur les méthodes et les outils de mesure. La mesure fournit un relevé d'indicateurs tandis que l'évaluation consiste à prendre des décisions pour atteindre les objectifs en s'appuyant sur des indicateurs mesurés. En d'autres termes, la mesure de performance est un moyen indispensable à l'évaluation de performance. Cette dernière permet de concevoir un nouveau système performant, de modifier un système ou encore de piloter un système existant. Selon [Jacot, 1990] « *la mesure conserve un rôle important mais s'en tient aux effets. L'évaluation est de portée plus générale : on tente de remonter aux causes et on se prononce également sur les objectifs et leur mise en œuvre* ». Il y a un lien fort entre les notions de mesure et d'évaluation de la performance. En effet, l'évaluation de la performance consiste à comparer l'écart entre la mesure et l'objectif.

Dans le schéma ci-dessous (Figure IV.2), nous expliquons notre vision d'évaluation de performance. En effet, la première étape consiste à définir les objectifs à atteindre : ce sont les décideurs qui doivent déterminer leurs politiques de gestion. Une fois ces objectifs déterminés, les indicateurs de performance doivent être définis avec précaution. C'est une phase cruciale dans la démarche d'évaluation car ce sont les indicateurs de performance qui donnent une indication soit d'une réussite ou d'un échec d'atteinte des objectifs. Pour mesurer ces indicateurs, il y a plusieurs façons dépendant du contexte général et du système étudié. En ce qui concerne notre travail de thèse, nous avons développé un outil de simulation qui permet de relever les valeurs d'indicateurs de performance issues des différentes comparaisons entre les scénarios de transfert de conteneurs. Il permet également d'agir sur le mode de fonctionnement et de tester différentes actions.

En général, il y a deux démarches possibles pour l'évaluation de la performance [Matthieu Laurus, 2004]:

- Evaluation de performance a priori : appelée « optimisation » elle consiste à établir le modèle à étudier afin de l'analyser par la suite. L'analyse permet l'obtention des performances du système étudié afin de les comparer aux objectifs fixés et la

modification des variables d'action du modèle dans le cas où les objectifs ne sont pas atteints.

- Evaluation de performance a posteriori : elle consiste d'abord à mesurer la performance du système étudié (le système existant). L'analyse du système permet d'établir des décisions pertinentes pour le pilotage du système. Cette analyse nécessite la maîtrise parfaite des flux (physiques, informationnels, financiers, décisionnels, etc.) du système étudié.

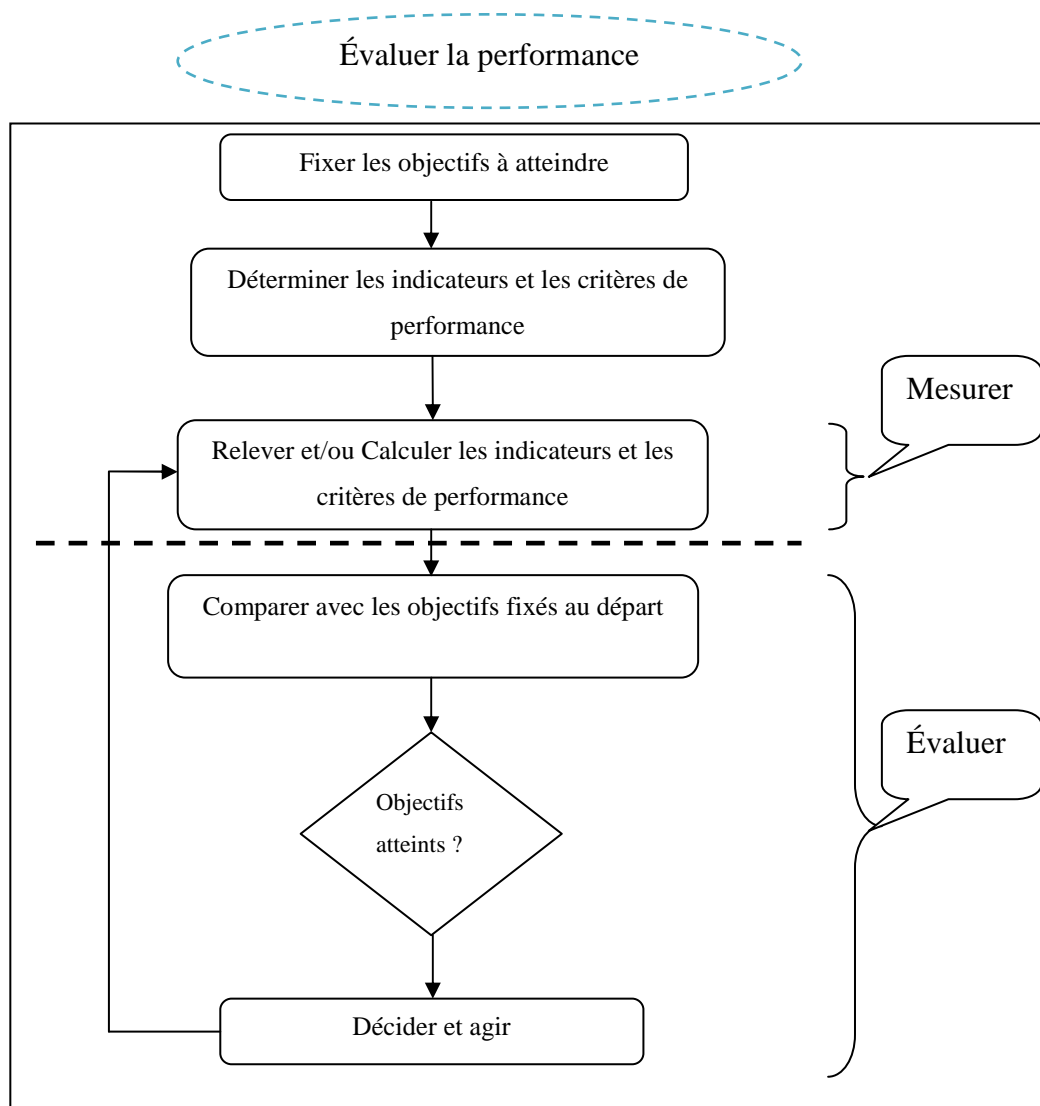


Figure IV.2. Démarche d'évaluation de la performance

D'après [Burlat et Boucher, 2003] la démarche d'évaluation de la performance se fait à travers un modèle d'interprétation du système réel. Elle s'effectue par l'analyse du modèle ou par la mesure directe. Ce modèle doit permettre la description des liens de causalité entre

les actions sur le système et ses performances en sortie. Ainsi, trois notions principales sont nécessaires à l'évaluation de la performance : l'objectif, la mesure et la variable d'action ou de décision). Ces trois notions doivent permettre l'identification d'un certain nombre d'indicateurs de performance qui peuvent être difficiles à quantifier [Tan, 2001].

3. MÉTHODES POUR LA MESURE ET L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE

3.1. Triplet efficacité / efficience / pertinence

L'évaluation de la performance d'une organisation peut être réalisée sur la base du triangle "Objectifs, Moyens, Résultats" et les concepts : efficacité, efficience et pertinence (Figure IV.3). L'efficacité est atteinte seulement si les résultats obtenus répondent aux objectifs fixés au départ. L'efficience consiste à assurer que le système est opérationnel, quant à la pertinence, il s'agit de prouver que les moyens offerts permettent d'atteindre les objectifs espérés.

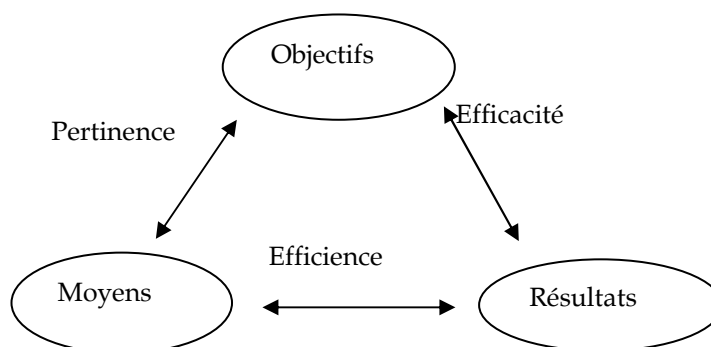


Figure IV.3. Triangle : Objectif, Moyen, Résultat

Cette approche ne propose pas une phase d'analyse des processus. Son objectif est de savoir si le système étudié est performant ou non mais d'une manière non structurée (aucune démarche à suivre).

3.2. La méthode ABC/ABM (L'Activity Based Costing et l'Activity Based Management)

L'Activity Based Costing (ABC) et l'Activity Based Management (ABM) sont des démarches destinées à donner des informations pertinentes sur les coûts et les marges. Elles permettent notamment d'améliorer l'utilisation des ressources disponibles en éclairant les choix de sous-traitance, en aidant à la définition de l'organisation des compétences ou en

dotant l'entreprise de tableaux de bord orientés vers le pilotage des performances [Ravignon et al, 1998]. La méthode ABC a été créée en 1980. Elle vise à analyser les coûts et les marges, mais va au-delà du simple calcul des frais de retour. Elle nécessite une connaissance approfondie de l'entreprise. Le principe de la gestion par activités consiste finalement à obtenir le coût réel d'un produit ou d'un service et, par extension :

- le coût de revient des composants du produit ou encore de chaque étape de son processus;
- le contrôle budgétaire global et détaillé ;
- le suivi des écarts, des dépassements, par activités et par produits ;
- la simulation de coûts de revient pour le lancement de tout nouveau produit ;
- le repérage des étapes à franchir pour atteindre une cible en termes de rentabilité.

En effet, la méthode ABC/ABM permet une bonne compréhension des processus du système étudié et elle est suggérée comme un bon support pour la comptabilité, par contre, elle est basée principalement sur les coûts qui sont affectés aux différentes activités de l'entreprise et elle nécessite la maîtrise de certaines compétences notamment en management et en gestion de projet [Matthieu Luras, 2004].

3.3. Le modèle BSC : Balanced ScoreCard

Il a été développé par Kaplan et Norton. Il vise des mesures équilibrées pour maintenir la stratégie de l'entreprise. Son principe repose sur quatre axes d'analyse: les clients, les finances, les processus internes, l'innovation et la croissance. Il intègre une dimension humaine à la mesure de la performance. Il est spécifiquement orienté vers la gestion générale et peut être appliqué à partir du niveau stratégique à travers le plan organisationnel. Il vise à établir des causalités entre la performance de chaque axe d'analyse [Kaplan et Norton, 2001].

Le BSC (Balanced ScoreCard) est un système de mesure de performance. Il permet de déterminer des indicateurs de performance correspondant aux objectifs financiers et de donner grâce à un ensemble limité d'indicateurs, une vue compréhensive de la façon dont les résultats sont obtenus.

3.4. Le modèle SCOR : Supply Chain Operation Reference modele

Il a été développé en 1996 par le Conseil de la chaîne d'approvisionnement. Il s'agit dans ce cas de la définition d'un modèle de référence visant à piloter les chaînes logistiques

en intégrant des indicateurs standard permettant d'analyser quatre dimensions : la fiabilité de la performance commerciale, la flexibilité / réactivité, le coût de la chaîne 'approvisionnement et la rotation du capital engagé [SCC, 2010]. Il peut être appliqué à toutes les entreprises du secteur industriel et des services, au niveau tactique et opérationnel pour une mise en œuvre des décisions relatives à la planification stratégique de l'entreprise. Le but du modèle SCOR est d'améliorer la performance par le contrôle des processus qui peut se faire grâce à la mesure. Ce contrôle des processus est un système difficile à mettre en place mais il est essentiel pour améliorer la performance.

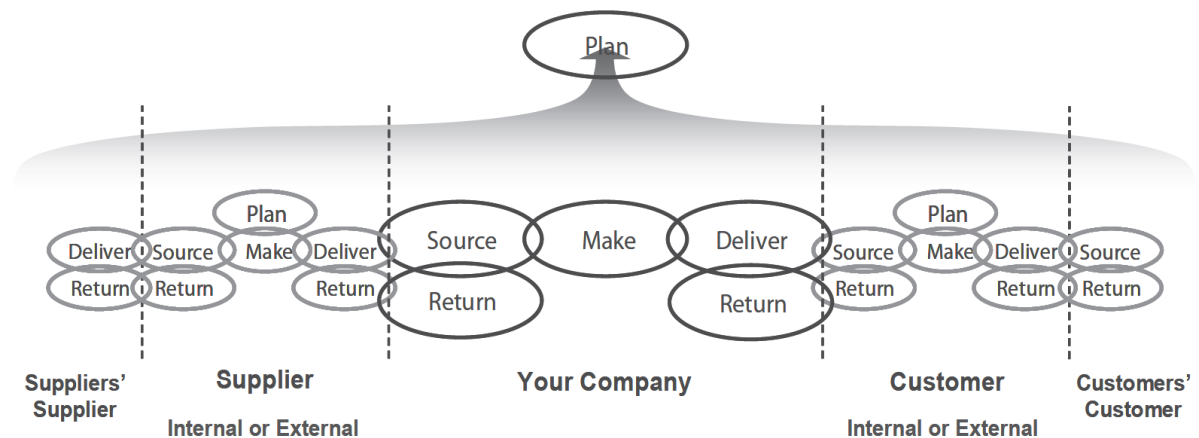


Figure IV.4. Le modèle SCOR version 10 (Source : [SCC, 2010])

Le modèle est constitué par cinq processus principaux (Figure IV.4) :

- PLAN : processus de planification ;
- SOURCE : processus d'approvisionnement ;
- MAKE : processus de fabrication ;
- DELIVER : processus de livraison ;
- RETURN : processus de retour.

En général dans l'approche SCOR, on distingue trois grandes étapes :

- L'analyse : pour décrire et modéliser la chaîne logistique concernée ;
- L'évaluation : l'étape évaluation offre des indicateurs de performance courants pour les chaînes logistiques ;
- L'amélioration : enfin cette étape vise à appliquer le modèle SCOR.

La démarche proposée par le modèle SCOR contient quatre niveaux à suivre :

- Le niveau 1 : décrit les processus d'une façon globale et il permet de définir le périmètre et le contenu du modèle SCOR en s'appuyant sur les fonctions (approvisionner, faire, délivrer, planifier et retourner) ;
- Le niveau 2 : définit les différentes catégories des cinq processus du niveau 1 permettant de définir la configuration et les méthodes de chaque composante de la chaîne étudiée ;
- Le niveau 3 : décompose et décrit chaque processus en activités permettant l'identification des flux d'informations entrant et sortant ;
- Le niveau 4 : ce niveau est laissé à l'appréciation des entreprises. Il ne propose pas d'indicateurs de performance et il consiste à descendre aux activités élémentaires.

La prise en compte, par l'application du modèle SCOR de toutes les activités liées au flux de matières et de produits conduit à des indicateurs de performance qui sont classés à l'aide de catégories de performance fournies par le modèle lui-même. Cet apport permet de répondre à la question du choix de la mesure. Le modèle SCOR est donc basé sur une méthode expérimentale permettant l'amélioration de la performance de la Supply Chain et les maillons qui la composent. Dans [Lepori et al, 2012], ce modèle a été appliqué sur un cas d'application dans un entrepôt d'un prestataire logistique Français qui est présent dans divers secteurs. Le choix a été porté sur le secteur agroalimentaire où les activités concernées par l'étude sont le stockage de produits finis, de matières premières et la préparation de commande. Mais il se dégage à travers ce cas d'étude certaines limites telles que l'évaluation de la performance de certains processus est incomplète. De plus c'est un modèle non informatisé où il manque l'étude de la corrélation entre les indicateurs de catégories différentes. En effet, SCOR prend en compte les deux aspects modélisation/évaluation de la performance mais il ne permet pas d'offrir une boîte à outils permettant de faire le lien entre les indicateurs de performance et les leviers d'action (variables de décision sur lesquels, les décideurs peuvent agir). Selon [Ducq, 2007], SCOR ne précise pas l'ensemble des objectifs de pilotage associés de même que les moyens d'action à mettre en œuvre. Ce sont parmi les principales critiques de ce modèle avec son absence de méthodologie d'implantation

3.5. La méthode ECOGRAI

ECOGRAI [Bitton, 1990], est une méthode pour concevoir et développer les Systèmes d'Indicateurs de Performance (SIP) pour les entreprises industrielles ou de services. Elle a été

développée dans le cadre de la modélisation GRAI suite au constat de Kaplan sur l'absence de méthode pour mettre en pratique les concepts de l'approche ABC. Elle permet de guider la conception et l'implantation des SIP et elle comprend six phases :

- Modélisation de la structure de pilotage du système de production et identification des centres de décision ;
- Identification des objectifs des centres de décision et analyse de cohérence ;
- Identification des variables de décision et analyse des conflits entre les variables de décision ;
- Identification des indicateurs de performances (IP) et analyse de cohérence interne ;
- Conception du système d'information (SI) des IP ;
- Implantation du SI des indicateurs de performance dans le SI du système de production.

Elle a été utilisée dans plusieurs travaux [Bonvoisin, 2011 ; Vincent, 2005] pour guider la conception et l'implantation d'un SIP. Elle est fondée sur deux étapes principales la conception et l'implantation. Le résultat de la phase de conception est un ensemble cohérent de fiches de spécifications décrivant chaque indicateur de performance (indicateurs, acteurs concernés, objectifs, variables d'actions, etc.). L'implantation et l'exploitation du système d'indicateurs de performance peuvent être supportées par des outils logiciels décisionnels et la phase de conception se fait à l'aide de la méthode GRAI.

3.5.1. La méthode GRAI (Graphe à Résultats et Activités Inter-reliés)

Cette méthode a été créée dans les années 1980 par le laboratoire GRAI de l'université de Bordeaux. Elle peut être appliquée dans divers domaines et son objectif consiste à analyser et à concevoir les systèmes de production [Doumeingts, 1984] en vue d'évaluer leurs performances. La méthode GRAI permet de rechercher les améliorations de performance (détection des points à améliorer et des points forts du système étudié). Elle permet également de simuler le comportement des processus. La méthode GRAI est basée sur la grille suivante (Figure IV.5):

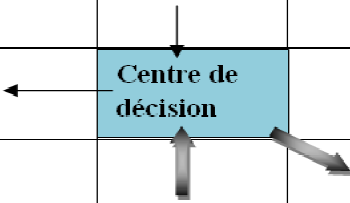
Fonctions H/P	Informations externes	Gérer les produits	Planifier la production	Gérer les ressources	Informations internes
Stratégique H = P =					
Tactique H = P =			 Centre de décision		
Opérationnel H = P =					

Figure IV.5. Grille Grai

a) Les colonnes : représentent les fonctions du système étudié ;

b) Les lignes : représentent les décisions à atteindre selon les différents niveaux décisionnels (stratégique, tactique et opérationnel). Chaque niveau est défini par une période P et un horizon de temps H ; un horizon peut être représenté par une ou plusieurs périodes ;

Au niveau stratégique, les décisions sont prises à long terme (cinq ans par exemple) et définissent la stratégie de l'organisme considéré. Au niveau Tactique, les décisions sont prises à moyen terme (par exemple une année), elles ont pour objectif d'assurer la liaison entre les deux autres niveaux en garantissant la cohérence des actions menées. Concernant le niveau opérationnel, les décisions sont prises à court terme et ont pour but de s'assurer du bon déroulement des activités de l'organisation considérée.

c) Les centre de décision : un centre de décision est l'intersection entre une fonction et un niveau de décision. En général un centre de décision est composé par une activité de décision, une relation d'entrée et une relation de sortie ;

d) Les flèches : les flèches simples représentent le flux informationnel et les flèches pleines représentent le flux décisionnel entre deux centres de décision ou encore entre un centre de décision et le monde extérieur de l'entreprise.

4. NOTRE DÉMARCHE ECOGRAISIM

Etant donné qu'un critère de performance est considéré comme une variable indispensable pour une prise de décision justifiée, le choix de ces critères ne doit pas se faire à la légère, mais plutôt d'une manière pertinente suivant une démarche structurée. En outre, plusieurs travaux sur la performance ne considèrent que les indicateurs de performance génériques [Zehendner et al, 2011 ; Bielli et al, 2006] : coût, qualité, temps. Dans [Henesey, 2006], les principales mesures de production dans un terminal à conteneurs sont essentiellement basées sur la productivité, alors qu'actuellement les décideurs ne se limitent

plus aux simples notions de productivité ou de qualité de produit. Ils doivent se concentrer à la satisfaction des clients ainsi que sur l'aspect écologique, etc. Ils doivent également déterminer les leviers d'action liés aux indicateurs de performance pour agir sur le système.

Dans la section précédente, nous avons donné un aperçu sur les méthodes de définition et d'implantation d'indicateurs de performance les plus connues (ECOGRAI, ABC/ABM, BSC, SCOR). D'après [Bonvoisin, 2011], aucune méthode n'est complète et chacune peut être améliorée en s'inspirant des méthodes existantes. En effet, toutes les méthodes que nous avons présentées dans la section précédente, reposent sur des éléments essentiels qui sont la modélisation, la compréhension du système concerné et les objectifs à atteindre afin de déterminer les indicateurs de performance [Bitton, 1990 ; Matthieu Lauras, 2004 ; Vincent, 2005 ; Bonvoisin, 2011; Doumeingts, 1984]. De plus trois notions sont essentielles à l'évaluation de la performance : l'objectif, la mesure et la variable d'action [Bitton, 1990 ; Berrah, 1997]. Ces trois termes sont définis dans [Berrah et al., 2000] comme suit :

- L'objectif représente l'état espéré du système piloté ;
- La mesure rapporte l'état réel constaté de ce même système ;
- La variable d'action constitue un levier sur lequel on peut agir en fonction de l'écart entre l'objectif et la mesure.

Il est donc essentiel de prendre en compte ces éléments dans notre démarche. En outre, notre objectif ne consiste pas seulement à la simple identification et mesure des indicateurs de performance mais plutôt à l'évaluation de la performance en s'appuyant sur des leviers d'action. Pour cela et en analysant le tableau comparatif (Tableau IV.1) entre les différentes méthodes présentées dans la section précédente, nous avons opté pour la méthode ECOGRAI, car son principe « triplet » permet de lier chaque indicateur de performance à au moins un objectif et à au moins une variable de décision. La méthode ECOGRAI repose sur la grille GRAI qui est considérée comme une bonne démarche de modélisation du système étudié permettant de :

- définir les centres de décision où chaque centre de décision montre les performances de cette décision (objectif et variable d'action).
- « *décrire l'organisation des processus d'un système soit dans le but de les simuler pour comparer divers scénarios, soit dans le but de les analyser et de les restructurer pour améliorer la performance du système* », [Vernadat, 1999].

	Avantages	Limites
ABC/ABM	<ul style="list-style-type: none"> - Simplifie le calcul des coûts de processus, complémentaire à la comptabilité et bonne pour la compréhension des processus de l'entreprise. - Améliore les activités et permet de supprimer des activités sans valeur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse basée seulement sur les coûts. - Peut conduire à retenir un nombre très élevé d'activités et se traduire par des procédures lourdes très difficiles à analyser.
BSC	<ul style="list-style-type: none"> - Spécifie les liaisons : indicateur- activité et indicateur-variable d'action (déterminant). - Des indicateurs cohérents avec la nature des activités. - Différents niveaux de pilotage (stratégique-opérationnel). 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficile de déterminer les causes de la non performance. - Absence de méthodologie d'implantation. - N'assure pas une vision globale de l'entreprise.
SCOR	<ul style="list-style-type: none"> - Spécifie la liaison : indicateur - activité - Des indicateurs cohérents avec la nature des activités. - Différents niveaux de pilotage (stratégique-opérationnel). 	<ul style="list-style-type: none"> - Absence de méthodologie d'implantation. - Difficile de déterminer les causes de la non performance. - N'assure pas une vision globale de l'entreprise.
ECOGRAI	<ul style="list-style-type: none"> - Spécifie les liaisons : indicateur - activité et indicateur - variable d'action - Définit un système cohérent d'indicateurs de performance. - La modélisation des processus de l'entreprise et la définition des centres de décision. - Différents niveaux de pilotage (stratégique-opérationnel). 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficile de déterminer les causes de la non performance. - Manque de méthode pour exprimer les objectifs stratégiques et puis locaux. - Manque de méthode pour la sélection des indicateurs de performance.

Tableau IV.1. Quelques avantages et limites des méthodes (ABC/ABM, BSC, SCOR, ECOGRAI)

Il s'agit donc bien d'une méthode permettant de répondre à nos attentes car il permet de comprendre le fonctionnement de notre système afin d'aider à la prise de décision et/ou d'améliorer son fonctionnement. ECOGRAI permet d'analyser la cohérence du système dans son ensemble grâce à ses différentes étapes. Le principe de la méthode ECOGRAI consiste à établir un lien entre les éléments du triplet « objectif – variable de décision – indicateur de performance ».

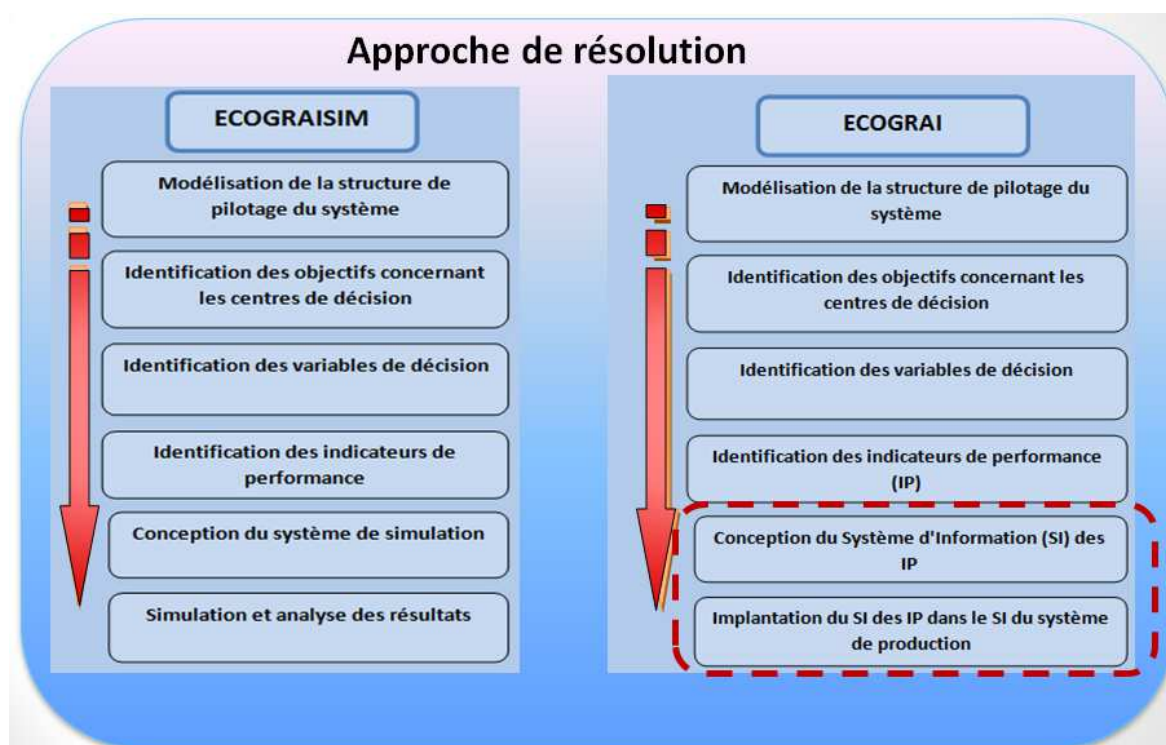


Figure IV.6.ECOGRAI et ECOGRAISIM

ECOGRAI offre donc un système d'aide à la décision où chaque objectif a un effet direct sur l'indicateur qui lui est associé d'une part, d'autre part, une variable de décision agit sur un indicateur de performance. Notre approche « ECOGRAISIM » consiste à suivre les quatre premières étapes de la méthode ECOGRAI afin de déterminer les indicateurs de performance qui seront calculés et mesurés par la simulation (Figure IV.6). La première étape consiste à établir la grille GRAI. Dans la deuxième étape, nous définissons les objectifs concernant les centres de décision et nous identifions les variables de décision dans la troisième étape. La quatrième étape permet d'obtenir les indicateurs de performance des centres de décision liés à la performance opérationnelle. Dans le prochain chapitre, nous présenterons plus en détail ces étapes en les appliquant sur le cas du port du Havre.

4.1. Limites d'ECOGRAI et contribution

L'utilisation de la méthode ECOGRAI permet d'avoir une vue globale du fonctionnement du système tout en identifiant les fonctions clés, ainsi que l'ensemble des indicateurs de performance liés à chacune d'elles. Elle offre une démarche logique de modélisation par approche « descendante » permettant la définition des objectifs stratégiques en objectifs opérationnels. Elle permet également de vérifier la cohérence des variables de décision et dans ses phases 4 et 5, la méthode va jusqu'à la conception du système d'information des indicateurs ainsi que son intégration au sein du système d'information général de l'organisme.

Toutefois, la méthode présente un certain manque au niveau de ses différentes étapes. La première phase, considérée comme l'un des fondements de la méthode ECOGRAI avec la définition de la grille GRAI, consiste à définir les objectifs mais manque de méthode et ne propose pas de cadre précis pour traduire la stratégie en objectifs stratégiques puis locaux [Renauld, 2008]. De plus, la sélection des indicateurs de performance se fait selon l'appréciation de l'utilisateur et par conséquent, ECOGRAI ne peut pas être considérée comme un outil résolutoire car elle n'offre pas une manière précise pour la sélection des indicateurs de performance [Bonvoisin, 2011].

Nous constatons également qu'ECOGRAI manque de méthode sur la manière d'identifier les variables de décision, de les présenter et finalement sur leur utilisation pour le pilotage. La méthode ECOGRAI permet d'identifier les variables de décision et de vérifier leur cohérence mais ne permet pas de déterminer les origines d'une déficience [Michel, 2009]. En effet, au niveau de la phase "Evaluation de la performance" et plus précisément quand il s'agit d'apporter des améliorations au système en se référant aux variables de décision, il est indispensable de prendre en considération les contraintes à respecter avant d'appliquer une telle variable d'action, chose qui est absente dans ECOGRAI. La méthode ECOGRAI, donc ne permet pas de décrire la ou les conditions nécessaires avant d'utiliser une variable de décision et ne permet pas également de définir qui décide quoi. Pour faire face à cet inconvénient, nous présenterons dans le chapitre suivant notre proposition consistant à rajouter une sous étape au niveau de l'identification des variables de décisions.

5. CONCLUSION

Le milieu socio-économique mondial actuel contraint toute organisation industrielle à être capable de s'adapter et à répondre rapidement aux différentes exigences pour rester performante et compétitive par la minimisation des coûts, la réduction des différents délais et l'amélioration du contrôle de la qualité [Kaplan et Norton, 2001; Berrah, 2002].

Dans ce chapitre, nous avons défini dans un premier temps les notions d'indicateurs, de mesure et d'évaluation de la performance. Ensuite, dans un deuxième temps, nous avons présenté les méthodes de définition des systèmes d'indicateurs de performance et nous avons montré que la mesure de la performance est un simple relevé ou calcul de valeurs, tandis que l'évaluation de la performance, objet de notre étude, consiste à comparer ces valeurs à des objectifs. La mesure de la performance est un moyen nécessaire et essentiel à l'évaluation de la performance et elle repose sur plusieurs méthodes. Nous avons montré également comment

nous pouvons définir un système d'indicateurs de performance pour la gestion d'une chaîne logistique. L'approche que nous avons proposée reprend l'ensemble des bons éléments des principales méthodes existantes de définition de systèmes d'indicateurs de performance, et tente de les compléter en offrant notamment une étape qui consiste à montrer efficacement comment agir sur le système à évaluer. En effet, notre approche consiste à modéliser le système avec la méthode GRAI afin de modéliser le système décisionnel de l'entreprise, de décomposer les objectifs stratégiques en objectifs locaux pour les niveaux de décisions inférieurs et de modéliser les flux d'informations circulant entre ces différents centres de décision. Ensuite, nous avons couplé la démarche ECOGRAI et la simulation à événements discrets.

CHAPITRE V : ECOGRAISIM :
MODÉLISATION ET ÉVALUATION DE
LA PERFORMANCE DU PORT DU HAVRE

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	83
2. NOTRE CONTRIBUTION D'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE	83
3. ECOGRAISIM POUR LE CAS DU PORT DU HAVRE	86
3.1. Schéma logistique actuel au port du Havre	87
3.2. Schéma logistique futur.....	88
3.3. Grille GRAI pour le nouveau schéma logistique du port du Havre	89
3.4. Objectifs, Variables de décision et Indicateurs de performance	94
3.5. Modélisation UML des activités du nouveau schéma logistique du port du Havre.....	97
3.5.1. Diagramme de cas d'utilisation	98
3.5.2. Diagrammes de classe	101
3.5.3. Objets de gestion et de coordination	105
3.5.4. Diagrammes de séquence	107
4. CONTRIBUTION À L'AMÉLIORATION DE L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE	109
5. CONCLUSION	110

1. INTRODUCTION

Un terminal à conteneurs est un système complexe. Pour le modéliser et représenter son fonctionnement dans sa globalité, nous avons montré dans le troisième chapitre que la simulation était l'approche la plus adaptée et comment nous pouvions définir un système d'indicateurs de performance pour la gestion d'une chaîne logistique dans le chapitre précédent.

Dans ce chapitre, nous présentons nos deux principales contributions. La première est la mise au point d'une nouvelle approche appelée ECOGRAISIM. Elle combine la méthode ECOGRAI et la simulation afin de déterminer, de mesurer et d'évaluer les indicateurs de performance. Cette méthode se décline en quatre étapes. La première étape consiste à établir la grille GRAI. Dans la deuxième étape, nous définissons les objectifs concernant les centres de décision et nous identifions les variables de décision dans la troisième étape. La quatrième étape permet d'obtenir les indicateurs de performance opérationnelle des centres de décision.

Notre deuxième contribution est une modélisation UML du nouveau schéma logistique du port du Havre. Cette modélisation a été réalisée dans le cadre des projets, ESSIMAS et DCAS, présentés dans la dernière section du premier chapitre. En nous appuyant sur cette modélisation, nous avons développé un système de simulation qui sera présenté dans le chapitre suivant. Nous précisons également notre contribution concernant la phase d'évaluation de la performance par ECOGRAISIM en nous référant aux diagrammes de séquences d'UML.

Avant de présenter notre approche ECOGRAISIM pour le cas du futur terminal multimodal, il convient tout d'abord de mettre l'accent sur notre problématique de recherche et le contexte de l'étude afin de préciser le périmètre de notre travail.

2. NOTRE CONTRIBUTION D'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE

Le contexte général de notre étude concerne la gestion de la chaîne logistique portuaire. En effet, les terminaux portuaires à conteneurs font face à une complexité croissante et leurs gestionnaires sont confrontés à de nombreux défis de prise de décisions. Vu la taille de la chaîne portuaire et le nombre important de ressources mises en jeu, la complexité est liée au grand nombre de données, de contraintes et aux objectifs

contradictaires. Cela laisse le champ de recherche dans ce domaine très largement ouvert et autant de pistes de développement sont possibles.

C'est dans ce contexte que nous proposons une démarche d'évaluation de la performance pour la gestion des terminaux à conteneurs dans une chaîne portuaire. En effet, l'objectif est d'aider les décideurs non seulement à savoir où ils se trouvent par rapport aux objectifs, mais aussi à offrir des leviers d'actions sur lesquels ils peuvent agir et vérifier s'ils sont sur la bonne direction en mesurant les indicateurs de performance entre eux-mêmes au fur et à mesure que le temps avance, soit à une référence connue.

Cependant, la plupart des travaux sur les problèmes portuaires que nous avons consultés ne considèrent que les indicateurs de performance génériques tels que : le coût, le temps, alors qu'actuellement l'enjeu consiste à tenir compte des notions de productivité ou de qualité en les combinant avec d'autres aspects de performance et à élargir la notion d'évaluation de performance sur plusieurs critères, entre autres : la satisfaction des clients et le respect de l'environnement. La performance est donc multicritères et le choix de ses indicateurs ne doit pas se faire à la légère, mais plutôt d'une manière pertinente suivant une démarche structurée. Parmi les méthodes existantes, nous avons présenté : la méthode ABC/ABM (L'Activity Based Costing et l'Activity Based Management), le modèle SCOR (Supply Chain Opérations Référence), BSC (Balanced ScoreCard) et la méthode ECOGRAI (ECONomie Graphe à Résultats et Activités Inter-reliés). Aucune méthode n'est complète et chacune peut être améliorée en s'inspirant des méthodes existantes [Bonvoisin, 2011]. Le principe de ces méthodes consiste à modéliser les processus du système à piloter afin de décomposer la structure organisationnelle et de gérer les interactions entre les activités [Matthieu Luras, 2004]. De telles considérations nous ont amenés à proposer une approche globale, ECOGRAISIM, avec une démarche générique pour la modélisation de la chaîne logistique portuaire tout en exploitant le potentiel d'ECOGRAI, la modélisation orienté objet et la simulation. Ceci permet d'avoir des indicateurs de performance justifiés avec des variables de décisions correspondant et adaptés à un contexte précis. D'un autre côté, ce choix permet une modélisation globale et complète de la chaîne logistique portuaire à travers une description à la fois décisionnelle et fonctionnelle. Un tel modèle permet à la fois d'étudier les performances de cette chaîne et de développer des stratégies de pilotage de flux et de contrôle d'une manière cohérente en tenant compte de différentes règles et contraintes. En effet, afin d'appréhender la complexité de la chaîne logistique portuaire, nous avons modélisé ses

processus de manutention en UML et simulé son fonctionnement afin d'intégrer à la fois, dans une même structure, l'aspect physique et fonctionnel de cette chaîne portuaire tout en procédant à l'évaluation de performance par une démarche générique. Toutefois, dans le cadre de cette thèse nous nous focalisons sur les aspects les plus importants, il s'agit :

- D'appréhender la chaîne portuaire sous ses différents aspects, qu'ils soient structurels, organisationnels, fonctionnels, comportementaux, informationnels et décisionnels selon les différents niveaux : stratégique, tactique et opérationnel. ECOGRAISIM, basée sur la méthode GRAI, consiste à décomposer les objectifs stratégiques en objectifs locaux pour les niveaux de décisions inférieurs et à modéliser les flux d'informations circulant entre les différents centres de décision. À un niveau stratégique, il est essentiel de déterminer l'équipement à utiliser et son agencement. Au niveau tactique, la capacité des équipements et des ressources humaines, l'affectation des différentes ressources et aussi les horaires des unités de transport doivent être décidés. Le niveau opérationnel fait référence aux décisions nécessaires pour optimiser les différents processus internes.

- D'analyser le comportement et le fonctionnement de la chaîne afin de déterminer les différents objectifs et variables d'actions pertinentes pour la prise de décision lors de la phase d'évaluation de la performance, cette phase consiste à définir les objectifs à atteindre. Une fois que ces objectifs sont déterminés, les indicateurs de performance doivent être définis avec précaution. C'est une phase cruciale dans la démarche d'évaluation car ce sont les indicateurs de performances qui donnent une indication soit d'une réussite ou d'un échec d'atteinte des objectifs.

- D'évaluer la performance de la chaîne par l'utilisation du système de simulation mis en œuvre. Le recours à la simulation est préconisé dans notre travail non seulement parce qu'il est capable d'évaluer l'impact des décisions prises, mais aussi, parce qu'il permet de fournir une meilleure représentation des systèmes complexes comme celui d'un terminal à conteneurs. La simulation permet de relever les valeurs d'indicateurs de performance issues des différents scénarios de transfert de conteneurs. Elle permet également d'agir sur le mode de fonctionnement et de tester différentes actions.

Concernant l'étape de modélisation qui doit précéder toute simulation, nous avons opté pour UML qui représente une réelle avancée dans le monde méthodologique de

l'approche objet. Son indépendance du domaine d'application et des langages de programmation lui donne la puissance d'être adapté à n'importe quel domaine.

Dans une chaîne portuaire nous distinguons deux catégories d'objets :

- les objets fonctionnels ou structurels : ce sont les objets qui composent le système étudié tels que : conteneur, engin de manutention, etc.

- les objets de coordination ou de gestion : leur objectif est de coordonner les objets structurels afin d'assurer les différentes tâches au sein d'une chaîne portuaire. Par exemple, les tâches principales de la gestion des transferts des conteneurs consistent à réserver et à gérer les voies et les engins nécessaires pour l'accueil et le départ des navettes.

La démarche que nous proposons pour l'évaluation de la performance d'une chaîne portuaire présente un lien fort entre les diagrammes de séquence d'UML et les variables de décision d'ECOGRAI. Cette relation permet de préciser quelle action est à envisager lors de la phase d'évaluation de la performance notamment au niveau de la vérification des conditions à respecter, avant de modifier une politique de gestion courante. Notre contribution permet donc de varier et d'évaluer plusieurs modes de fonctionnement en offrant plusieurs choix aux décideurs.

Après avoir délimité le contexte et le périmètre de notre approche, nous présentons dans ce qui suit, les différentes phases de notre démarche sur le cas du port du Havre.

3. ECOGRAISIM POUR LE CAS DU PORT DU HAVRE

Le port du Havre est le premier port à conteneurs pour le commerce extérieur de la France. Partant de sa politique d'encouragement des modes massifiés (ferroviaire et fluvial), le port du Havre a construit une plateforme multimodale pour fluidifier ses échanges avec son hinterland.

Avant de présenter notre contribution, il convient de rappeler les définitions suivantes :

- TM : Terminal Maritime ;
- TMM : Terminal MultiModal ;
- Coupon : est un ensemble de cinq wagons ;
- Rame : est un ensemble de coupons ;
- Navette : est une rame + une locomotive.

- Le terminal multimodal comprend :

- Une cour fluviale ;
- Une zone de stockage de capacité de 3000 EVP manutentionnée par grues mobiles ;
- Une cour ferroviaire composée de 8 voies ferrées + 2 portiques de manutention ;
- Un faisceau de réception des trains composé de 8 voies ;

- La cour ferroviaire du terminal multimodal du port du Havre qui est composée d'un ensemble de 8 voies parallèles pour le transfert rail/rail des conteneurs. La manutention des conteneurs se fait par deux portiques enjambant toutes les voies. Deux petits buffers (sud et nord de la cour ferroviaire) sont réservés pour le stockage temporaire des conteneurs.

- Il existe différents terminaux dédiés au traitement des marchandises diverses, représentés majoritairement par le trafic conteneurisé. Les principaux sont :

- Terminaux nord (Quais de l'Atlantique, Amériques, Europe) ;
- Terminaux sud (Quais de l'Asie, Osaka, Bougainville) ;
- Port 2000 : Terminal de France (TDF), Terminal de la Porte océane (TPO), Terminaux de Normandie associés à Mediterranean Shipping Company (TNMSC).

- En fin, le transbordement des conteneurs vers les barges se fait dans deux postes à quai équipés de deux portiques couvrant les 4 voies ferroviaires pour l'arrivée des navettes.

3.1. Schéma logistique actuel au port du Havre

Le schéma logistique actuel est basé sur le transport routier (Figure V.1). En effet, le camion vient chercher les conteneurs directement dans les terminaux maritimes. Le transfert des conteneurs par ce mode peut donc se faire sans rupture de charge, du terminal maritime à la porte de l'entrepôt de livraison. Pour la partie fluviale, une part de ce trafic se fait aussi directement du quai vers la barge. Du fait de l'absence d'accès direct fluvial au terminal Sud, certaines barges ne peuvent y accéder. Pour pallier ce manque d'accès direct, les conteneurs de certaines barges sont manutentionnés sur un autre terminal jouant le rôle du hub pour les barges, avant d'être transférés via navette ferroviaire jusqu'aux terminaux qui ne sont pas accessibles. Cependant ce transfert ferroviaire se fait suivant une procédure dérogatoire,

bloquant des voies routières et utilisant beaucoup de ressources humaines. De plus, ce mode de transfert cause plusieurs problèmes au niveau de la pollution et de l'augmentation des différents coûts de manutention et de transfert de conteneurs.

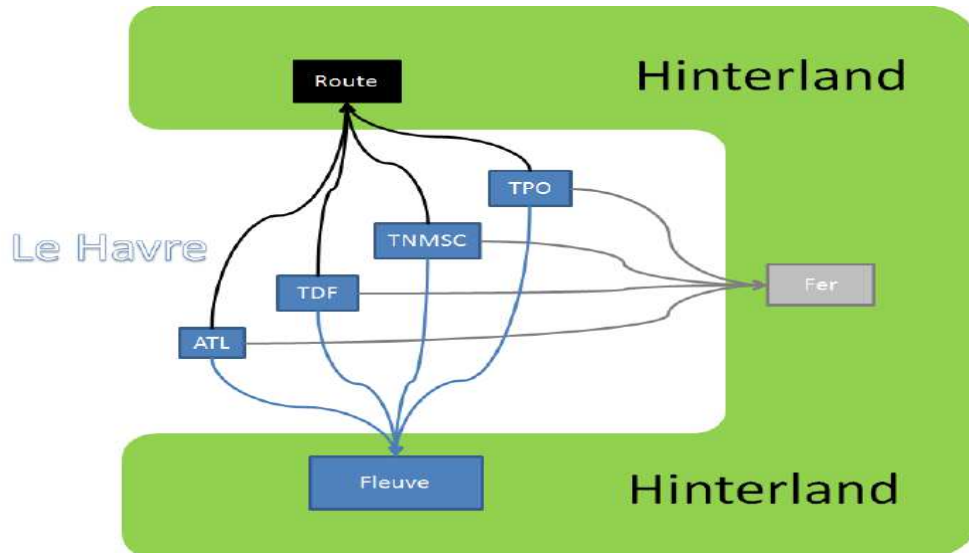


Figure V.1. Schéma logistique actuel

3.2. Schéma logistique futur

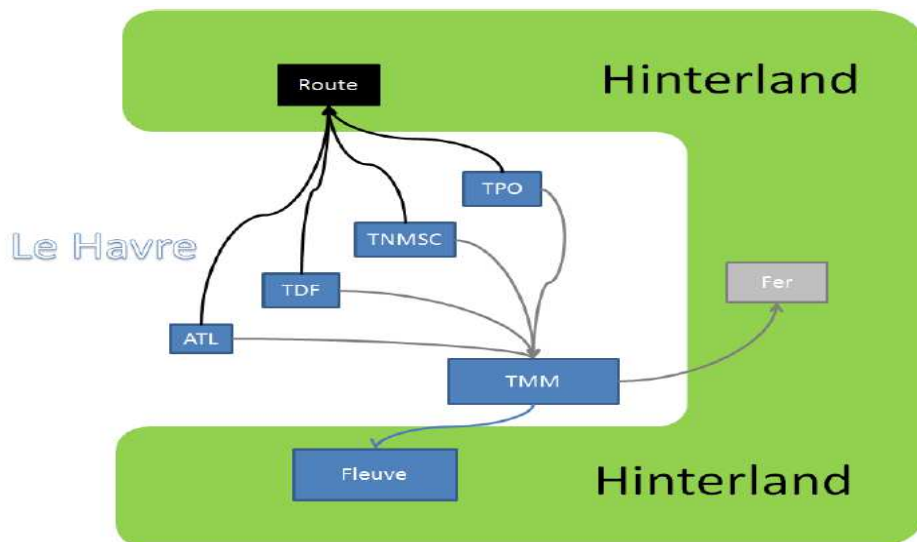


Figure V.2. Nouveau schéma logistique

Il s'agit d'un système de navettes ferroviaires permettant la livraison des conteneurs sur le terminal multimodal où ils seront repositionnés sur des trains de grandes lignes ou des barges à destination de l'hinterland (Figure V.2).

C'est dans la vision de ce nouveau schéma logistique que nous avons proposé, dans le cadre des deux projets DCAS et ESSIMAS, des solutions efficaces et rentables pour le transfert des conteneurs par navettes ferroviaires. L'objectif est la modélisation et la simulation du transfert massifié des conteneurs par navettes ferroviaires entre le futur terminal multimodal et les terminaux maritimes du port du Havre. Il s'agit d'étudier la performance des transferts des conteneurs. La problématique abordée ici peut se résumer dans les questions suivantes :

- Comment peut-on déterminer les indicateurs de performance pour évaluer le nouveau schéma logistique du port du Havre ?
- Comment peut-on mesurer la performance du terminal multimodal ?
- Enfin, comment peut-on développer une démarche permettant de modéliser et d'évaluer la performance du nouveau schéma logistique du port du Havre ?

3.3. Grille GRAI pour le nouveau schéma logistique du port du Havre

ECOGRAISIM repose sur la grille GRAI comme une démarche de modélisation du système étudié permettant de définir les centres de décision. Chaque centre de décision montre les performances d'une telle décision (objectif et variable d'action). Avant d'élaborer la grille GRAI, nous présentons un schéma introductif (Tableau V.1) permettant de décrire les enjeux du port du Havre pour chaque niveau décisionnel :

- Stratégique (Horizon 5 ans, Périodicité 6 mois) : les décisions portant sur les investissements à long terme, le développement des moyens de travail et la planification ;
- Tactique (Horizon 6 mois, Périodicité 1 mois) : les décisions portant sur les investissements à court terme, les développements des supports à la manutention et le transfert ;
- Opérationnel (Horizon 1 mois, Périodicité 1 semaine) : les décisions portant sur l'ajustement des ressources, l'ordonnancement des tâches et la gestion de la relation clients ;
- Temps réel (Horizon 1 semaine, Périodicité temps réel) : les décisions portant sur le traitement des commandes, la manutention et la livraison des conteneurs.

La figure V.3 présente une grille fonctionnelle basée sur les fonctions clés du port du Havre. La figure V.4 montre une grille fonctionnelle fondée sur les fonctions du nouveau schéma logistique en incluant le terminal multimodal :

- a) Les colonnes : représentent les fonctions ;
- b) Les lignes : représentent les décisions à atteindre selon les différents niveaux décisionnels (stratégique, tactique et opérationnel). Chaque niveau est défini par une période P et un horizon de temps H. Un horizon peut être représenté par une ou plusieurs périodes ;
- c) Un centre de décision est l'intersection entre une fonction et un niveau de décision. En général, un centre de décision est composé d'une activité de décision, d'une relation d'entrée et d'une relation de sortie ;
- d) Les flèches : les flèches simples représentent le flux informationnel et les flèches pleines représentent le flux décisionnel entre deux centres de décision ou encore entre un centre de décision et le monde extérieur.

Pour élaborer les deux grilles fonctionnelles, nous avons mené, en collaboration avec les membres des projets ESSIMAS/ DCAS au niveau du port du Havre, une étude d'analyse du contexte général du port. En effet, nous avons renseigné les différents enjeux du port selon les niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Ces deux grilles fonctionnelles montrent l'adéquation entre les objectifs du port et son nouveau schéma logistique concernant les terminaux à conteneurs. En effet, le terminal multimodal est une plateforme intermédiaire qui permet d'assurer le transport de conteneurs (collecte-livraison) en utilisant une nouvelle gestion des transferts de conteneurs par : trains, barges fluviales et route. L'enjeu principal est de massifier le transport de conteneurs en utilisant des navettes ferroviaires pour le transfert entre le terminal multimodal et les différents terminaux maritimes d'une part. D'autre part, la livraison des conteneurs vers leurs destinations finales sera effectuée par des trains de grande ligne et des barges via l'axe Seine. Cette plateforme intermédiaire permet aux barges de ne plus faire le tour des terminaux maritimes pour livrer et/ou recevoir les conteneurs. Elles peuvent charger/décharger leurs conteneurs sur la plateforme multimodale. Ce sont les navettes ferroviaires qui se chargent de faire le post/pré acheminement des terminaux maritimes. L'objectif est de faciliter le (dé) chargement ferroviaire et de rendre le transport ferroviaire plus flexible.

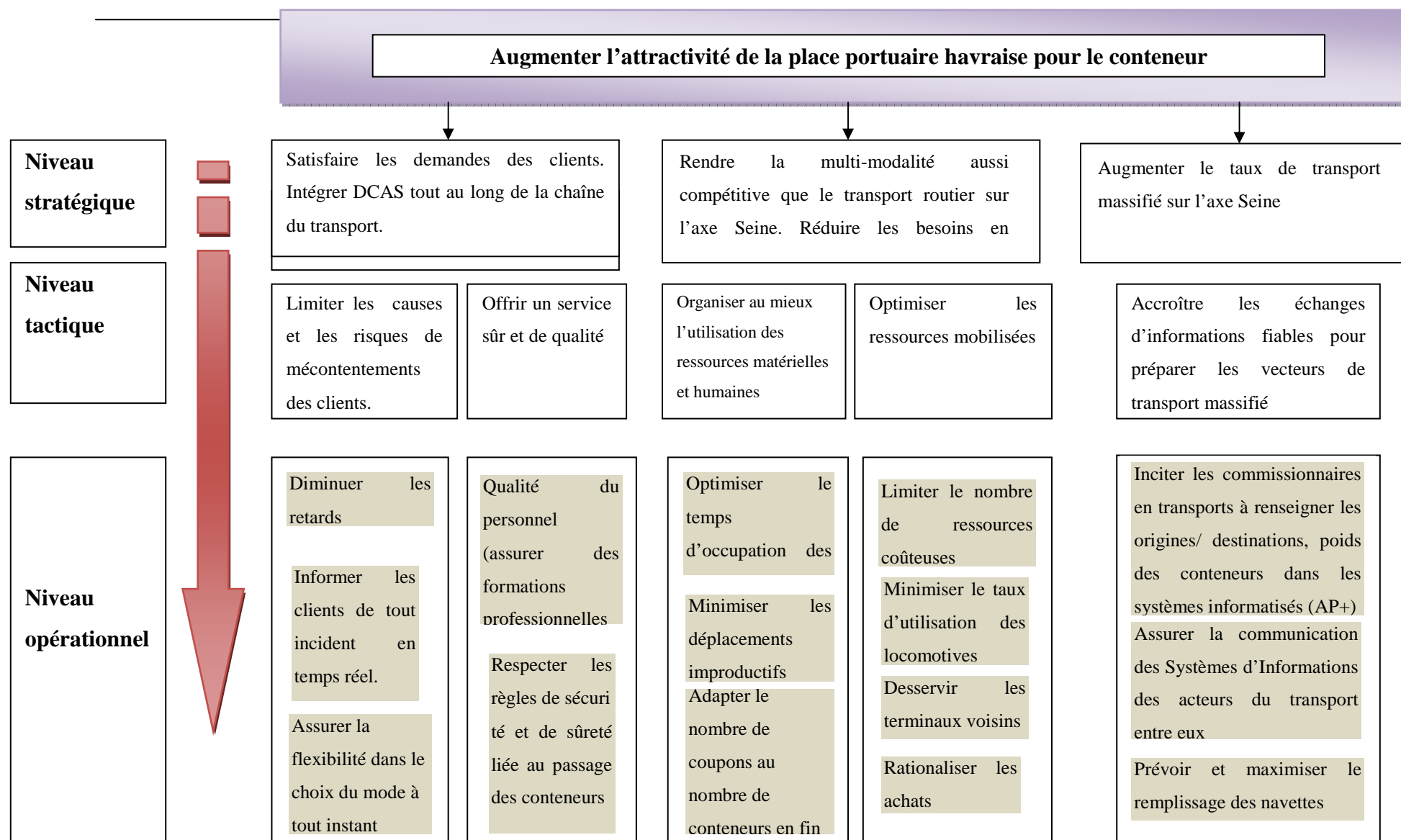


Tableau V.1. Tableau introductif

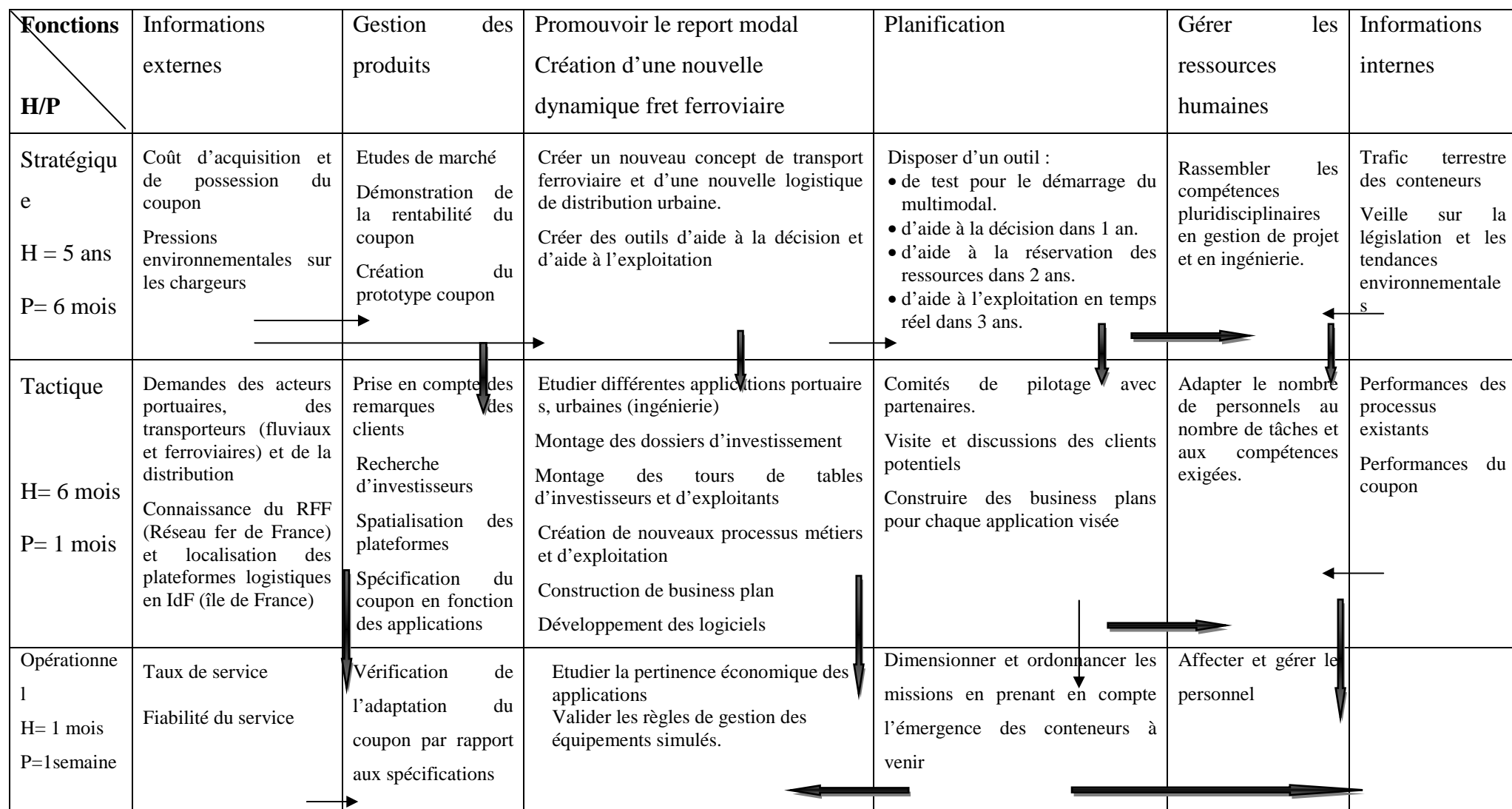


Figure V.3. GRAI pour les enjeux du projet du terminal multimodal

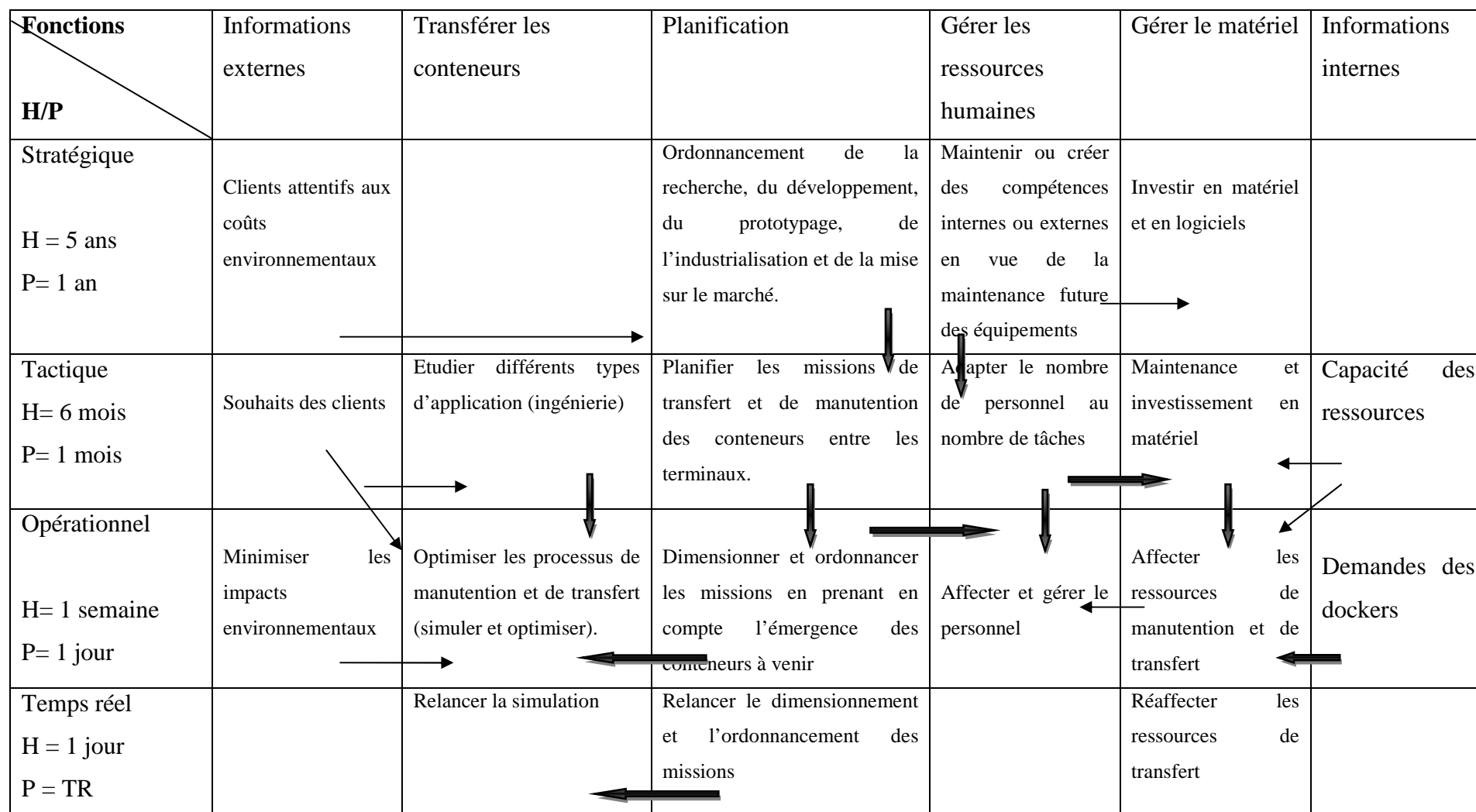


Figure V.4. GRAI pour l'exploitation du terminal multimodal

Pour déterminer les indicateurs de performance du transfert des conteneurs au sein du port du Havre entre le terminal multimodal et les terminaux maritimes, nous nous sommes focalisés sur le centre de décision CD1 « optimiser les processus de manutention et de transfert » situé au niveau opérationnel. Ce choix est motivé par le fait que CD1 correspond au problème d'évaluation de la performance du transfert de conteneurs, objet de notre étude. Ce centre est en relation avec le centre de décision CD2 « Dimensionner et ordonnancer les missions de transfert en prenant en compte l'émergence des conteneurs à venir », car un dimensionnement des navettes ferroviaires et un ordonnancement optimal des transferts impactent directement les processus de manutention et de transfert de conteneurs. Le centre de décision CD1 prend en compte les informations externes relatives aux attentes des clients. En nous appuyant sur la grille GRAI du nouveau schéma logistique, nous avons déterminé les objectifs, les variables de décisions du centre CD1 ainsi que ses indicateurs de performance.

3.4. Objectifs, Variables de décision et Indicateurs de performance

La première phase est la définition des objectifs du centre de décision « optimiser les processus de manutention et de transfert ». Les objectifs de ce centre sont, d'une part, la minimisation des différentes pénalités concernant les retards, les dépenses et l'émission de CO₂, il s'agit également de la minimisation de l'écart entre la date de livraison prévue et la date de livraison au plus tard et d'autre part, la minimisation du prix de transport en fonction du temps de transfert selon la destination, du temps de manœuvre en fonction du chantier et du temps de (dé)chargement.

Après avoir fixé les objectifs, l'étape prochaine consiste à déterminer les variables sur lesquelles nous pouvons agir afin d'atteindre les objectifs fixés. Afin de transférer un maximum de conteneurs, nous avons défini les actions suivantes :

- Privilégier la composition des navettes pour desservir une même destination ce qui permettra d'éviter les manœuvres ferroviaires coûteuses et longues ;
- Positionner les navettes en face des conteneurs à manutentionner ;
- Limiter les manœuvres des navettes au niveau du terminal multimodal. Pour ceci, il faut faire un assemblage sélectif des wagons en fonction de leur destination (train ou barge) dans les terminaux maritimes lors de la manutention ;

- Dans les terminaux maritimes, la manutention des conteneurs destinés au fluvial, doit prendre en compte le numéro du poste à quai, les conteneurs pour le poste 1 seront en tête et ceux pour le poste 2 en queue ;
- Dans les terminaux maritimes, la manutention des conteneurs destinés au transport ferroviaire, doit prendre en compte les numéros des secteurs de la cour ferroviaire (charger le conteneur en tête ou en queue selon le numéro du secteur) ;
- Pour minimiser les coûts de traction, des wagons fluviaux pourront être associés à des wagons ferroviaires au sein d'une même navette ;
- Si les conteneurs à l'export à destination d'un des terminaux maritimes ne sont pas assez nombreux pour remplir une navette, alors il est possible de la compléter avec des conteneurs à destination d'un terminal voisin pour limiter le nombre de trajets des locomotives.

Le tableau V.2 illustre des indicateurs de performance dont chacun est lié au moins à un objectif et au moins à une variable de décision. L'exigence d'établir un lien entre les éléments des triplets « objectif – variable de décision – indicateur de performance » permet de ne retenir que les indicateurs pertinents dans le cadre de la stratégie globale du terminal multimodal.

Objectifs	Réduire l'émission du CO ₂	•	•		
	Satisfaire les clients			•	•
	Minimiser le coût (nombre de : locomotives, de portiques, et de wagons)	•	•	•	•
	Respecter les dates de livraison			•	•
	Indicateurs de performance	Taux d'occupation des ressources	Taux de déplacements improductifs	Nombre de conteneurs transférés en retard	Nombre de conteneurs livrés
Variables de décision	Privilégier la constitution des navettes d'une même destination	•			•
	Assurer la polyvalence des dockers	•			
	Maximiser le remplissage des navettes en desservant les terminaux voisins	•		•	•
	Positionner les coupons en face des conteneurs à manutentionner		•		
	Evaluer les coûts pour une période régulière	•	•	•	•

Tableau V.2. Tableau des indicateurs de performance

3.5. Modélisation UML des activités du nouveau schéma logistique du port du Havre

Pour tout projet de développement d'un outil ou logiciel, il faut tenir compte des critères de conformité, de fiabilité, de sécurité et de maintenabilité de l'outil [Vincent, 2005]. Toute analyse informatique passe en premier temps par une étude fondamentale ou encore l'étude de l'existant, qui est supposée être le seul moyen de prendre connaissance sur l'état du réel. Elle consiste à l'identification, au recueil des besoins et à la précision des objectifs. Pour ce faire nous avons opté pour UML [Gabay et Gabay, 2008] afin de modéliser les différents processus de manutention et de transfert massifié de conteneurs en vue de développer un système de simulation.

UML, langage de modélisation objet, est la forme contractée de « Unified Modeling Language » qui peut se traduire en français par langage unifié pour la modélisation. Il permet de modéliser de manière claire et précise la structure et le comportement d'un système indépendamment de toute méthode ou de tout langage de programmation. UML modélise le système suivant deux modes de représentation, la structure du système et sa dynamique de fonctionnement. UML définit treize diagrammes différents, chacun d'eux est dédié à la représentation d'un système suivant un point de vue particulier. Les processus sont formalisés sous forme de diagrammes.

Le langage UML propose des diagrammes selon les deux aspects : statique et dynamique, mais il n'offre pas de méthode de modélisation. Nous avons ainsi opté pour la démarche UP (Processus Unifié) et plus précisément UP7 [Gabay et Gabay., 2008]. Elle s'articule autour des phases de modélisation métier, exigences fonctionnelles, analyse des cas d'utilisation, synthèse de l'analyse, conception, implémentation et tests. La mise en œuvre de la démarche s'appuie sur les différents diagrammes qui sont réalisés en respectant une chronologie précise. Elle se focalise sur la description fonctionnelle du système de façon à pouvoir décrire globalement ses fonctionnalités principales vis-à-vis des acteurs. Dans un souci de clarté, nous ne présentons ici que quelques extraits des diagrammes que nous avons élaborés.

En effet, pour notre cas d'étude, une première simulation du transfert des conteneurs entre deux terminaux maritimes et le chantier multimodal a été réalisée. Lors de cette première phase, nous avons rencontré des difficultés liées au fait que le terminal multimodal ne soit pas encore construit et que les activités de transferts ne puissent pas être observées, ce

qui a rendu difficile la description des différents acteurs et des différentes règles de gestion. Pour pallier à ce manque, le transfert des conteneurs sur le domaine portuaire a été modélisé sur la base du langage UML et de la démarche UP7, afin de clarifier les différentes activités, vérifier la pertinence des concepts et leur cohérence, avant de les implémenter dans l'outil de simulation.

La modélisation concerne :

- Les processus de composition des navettes qui assurent le transfert de conteneurs entre les terminaux ;
- Les processus concernant les manœuvres ferroviaires pour le déplacement des navettes ferroviaires ;
- Les processus de chargement et de déchargement des unités de transport (trains, navettes, barges).

3.5.1. Diagramme de cas d'utilisation

Avant de développer un système, il faut savoir précisément à QUOI il devra servir, c.-à-d. à quels besoins il devra répondre. Modéliser les besoins permet de faire l'inventaire des fonctionnalités attendues et d'organiser les besoins entre eux de manière à faire apparaître des relations (réutilisations possibles, etc.).

Avec UML, nous modélisons les besoins au moyen de diagrammes de cas d'utilisation. Un cas d'utilisation est un service rendu à l'utilisateur, il implique des séries d'actions plus élémentaires. Un acteur est une entité extérieure au système modélisé, et qui interagit directement avec lui. Un cas d'utilisation est l'expression d'un service réalisé de bout en bout, avec un déclenchement, un déroulement et une fin, pour l'acteur qui l'initie. Par ailleurs, il faut savoir qu'un acteur correspond à un rôle et non pas à une personne physique.

La figure V.5 représente le diagramme de cas d'utilisation pour notre cas d'étude. Il nous a permis de définir les grandes fonctionnalités du système et notamment les échanges internes. Il est composé de deux volets, d'une part le renseignement des acteurs qui bénéficient de l'utilisation du système ; pour notre cas nous avons renseigné un type d'utilisateur qui est l'agent de simulation et d'autre part les fonctionnalités attendues par le système.

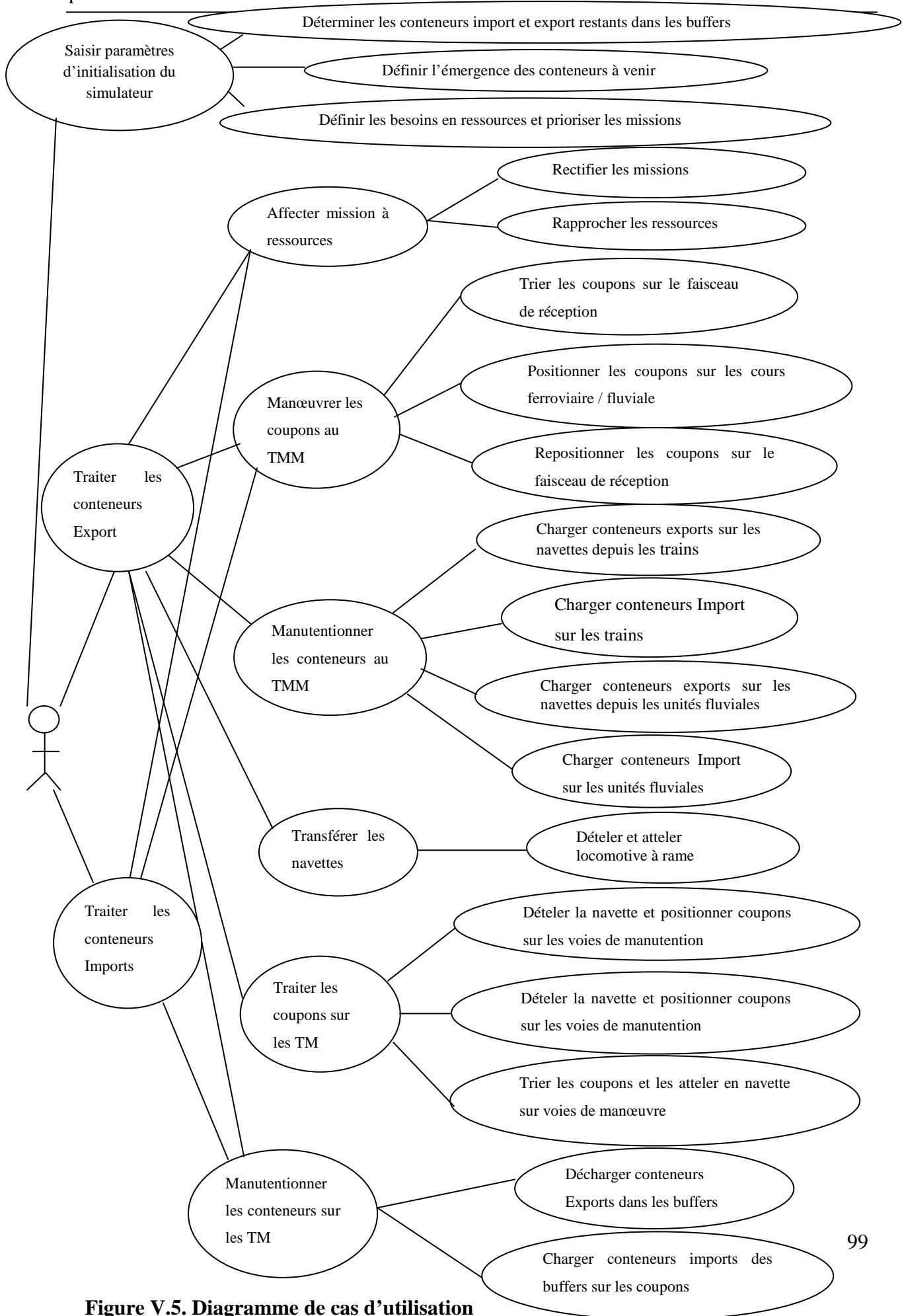


Figure V.5. Diagramme de cas d'utilisation

Quatre grandes phases sont nécessaires pour effectuer un transfert en import ou en export :

- Affecter les ressources : rapprochement des ressources de transfert : locomotive et wagons ;
- Préparer la navette : chargement, assemblage des wagons et le tri selon la destination ;
- Transférer la navette ;
- Traiter la navette : à l'arrivée du terminal multimodal, le système traite la navette sur les deux sites, fluviale et ferroviaire.

Notre système traite des conteneurs destinés à l'import et d'autres destinés à l'export. Donc l'agent de simulation peut effectuer des opérations de transfert en « Import » ou en « export ». Le processus d'import commence depuis les zones de stockage des terminaux maritimes jusqu'au terminal multimodal, alors que celui de l'export se fait depuis le terminal multimodal jusqu'aux terminaux maritimes (zones de stockage).

Pour l'import, s'il y a des conteneurs à transférer, la première action consiste à rapprocher les ressources nécessaires et disponibles à savoir les wagons, les portiques et les agents de manœuvre en leur affectant les missions de manutention et de différentes manœuvres. Ensuite l'étape suivante est le chargement et l'assemblage des coupons, en tenant en compte la destination des conteneurs et leurs dates de livraison. Une fois que le chargement et l'assemblage sont terminés, une locomotive disponible sur les lieux est appelée pour constituer la navette qui se dirigera vers le terminal multimodal.

À l'arrivée du terminal multimodal, la première étape est le désassemblage de la navette ; ensuite la locomotive se dételle de l'ensemble des coupons, elle devient disponible. L'étape suivante consiste à trier et positionner les coupons. Ensuite le portique commence la manutention des conteneurs soit sur les trains ou bien sur les barges et les coupons vides seront déplacés vers le faisceau de réception.

Concernant l'export, les conteneurs sont déchargés soit depuis les barges soit depuis les trains de grandes lignes. Ensuite les mêmes opérations décrites dans le processus import seront exécutées et à la fin, la navette sera transférée vers le terminal maritime de destination.

Pour spécifier la structure et les liens entre les objets, la prochaine étape est l'élaboration des diagrammes de classe [Benghalia et al., 2014a].

3.5.2. Diagrammes de classe

Les diagrammes de cas d'utilisation modélisent à QUOI sert le système. Le système est composé d'objets qui interagissent entre eux et avec les acteurs pour réaliser ces cas d'utilisation. Les diagrammes de classe permettent de spécifier la structure et les liens entre les objets dont le système est composé. Une classe est la description d'un ensemble d'objets ayant une sémantique, des attributs, des méthodes et des relations en commun. Elle spécifie l'ensemble des caractéristiques qui composent des objets de même type. Une classe est composée d'un nom, d'attributs et d'opérations. Selon l'avancement de la modélisation ces informations ne sont pas forcément toutes connues.

Nous avons développé des diagrammes de classe pour modéliser les processus de manutention et de transfert. Vu le grand nombre de classes dans notre modélisation, nous avons décidé d'utiliser les packages pour simplifier la compréhension et rendre les diagrammes plus lisibles.

Un package est un regroupement logique de classes ayant une forte cohésion interne et un faible couplage externe. Le couplage s'exprime structurellement par des liens entre les classes (associations, agrégations, compositions ou généralisation), et dynamiquement par des interactions qui se produisent entre les instances de classes.

Nous avons donc créé quatre packages selon la nature des objets : Technologie, Personnel, Infrastructure et Conteneur (Figure V.6).

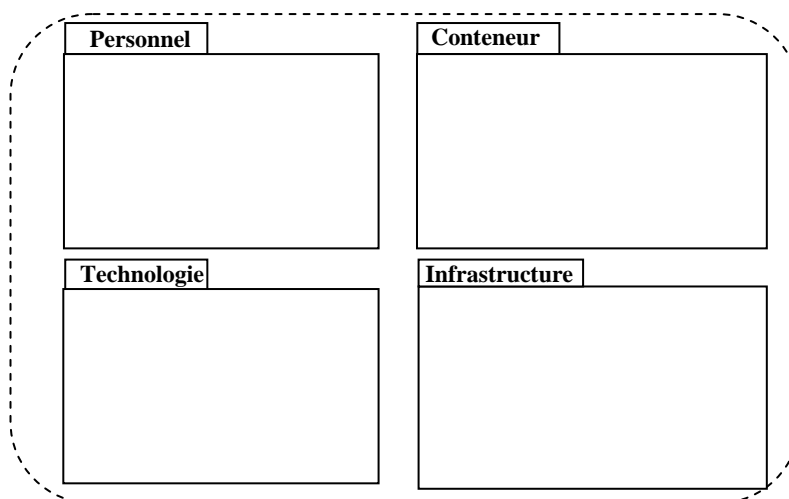


Figure V.6. Les packages du diagramme de classe

- ❖ **Package « Technologie »** : il contient l'ensemble des équipements et des engins destinés à la manutention et au transfert des conteneurs. Parmi les engins de manutention, nous

pouvons citer : le portique ferroviaire, le portique fluvial, le cavalier et le reachstacker. Concernant, les engins de transport, nous proposons : la navette, le locotracteur, le train de grande ligne, l'unité fluviale et la locomotive.

❖ **Package « Infrastructure »** : dans ce diagramme nous avons regroupé les différentes classes de type infrastructure. Les deux classes principales sont « Terminal » et « réseau ferré ». La classe « terminal multimodal » hérite de la classe mère « Terminal », en plus elle est composée d'une cour fluviale, d'une cour ferroviaire et d'un faisceau de réception.

- Cour fluviale : c'est une zone destinée aux unités fluviales. Elle est composée de deux postes à quai et de trois voies ferrées avec un buffer de stockage temporaire nécessaire pour les opérations de manutention.
- Cour ferroviaire : elle est constituée d'un buffer et de dix voies ferrées ; deux voies ferrées en chaussée destinées au déchargement de trains, et huit voies ferrées sous portiques pour le chargement et le déchargement des coupons.
- Faisceau de réception : c'est une zone de réception des trains de grandes lignes et des navettes dans le cas où toutes les voies sont occupées.

Les différents types de voies que nous avons modélisés sont : la voie principale, la voie de faisceau, la voie de raccordement, la voie de liaison, la voie de manœuvre et la voie de manutention.

❖ **Package « Personnel »** : dans ce diagramme nous mettons en évidence l'interaction entre les ressources humaines du terminal multimodal. Par exemple nous retrouvons les classes :

- Agent de régulation ;
- Docker ;
- Conducteur de locomotive ;
- Agent de manœuvre ;
- Agent de manutention ;
- Responsable du poste d'aiguillage.

❖ **Package « Conteneur »** : un conteneur est destiné soit à l'import ou à l'export. Ainsi, la classe « conteneur » se spécialise et contient deux classes : « Conteneur Import » et « Conteneur Export ». Un objet de la classe « Conteneur Import » modélise un conteneur

situé dans l'un des terminaux maritimes et destiné au terminal multimodal, afin d'être livré à sa destination finale, via la voie ferroviaire en train de grande ligne, la voie fluviale en barge ou la voie routière en camion. « Conteneur Export » est un conteneur destiné à l'étranger, situé au terminal multimodal et qui va être transporté par navette à l'un des terminaux maritimes.

Après avoir défini les packages, nous allons représenter le diagramme de classe selon trois façons, afin de bien exprimer et préciser les relations et leurs types (Figure V.7).

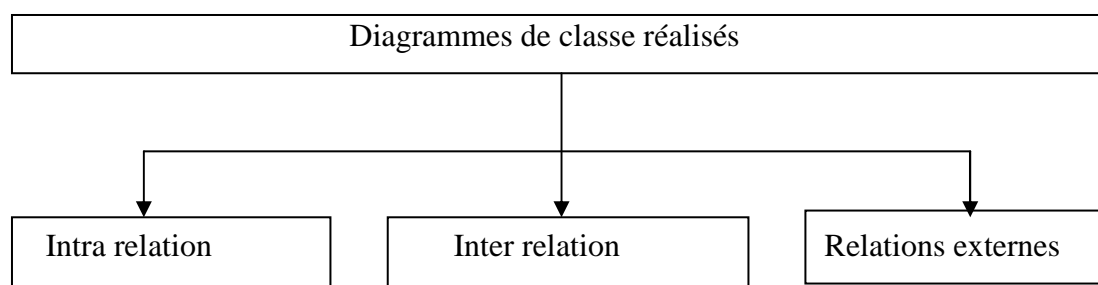


Figure V.7. Diagrammes de classe réalisés

a) Diagramme de classe « intra » :

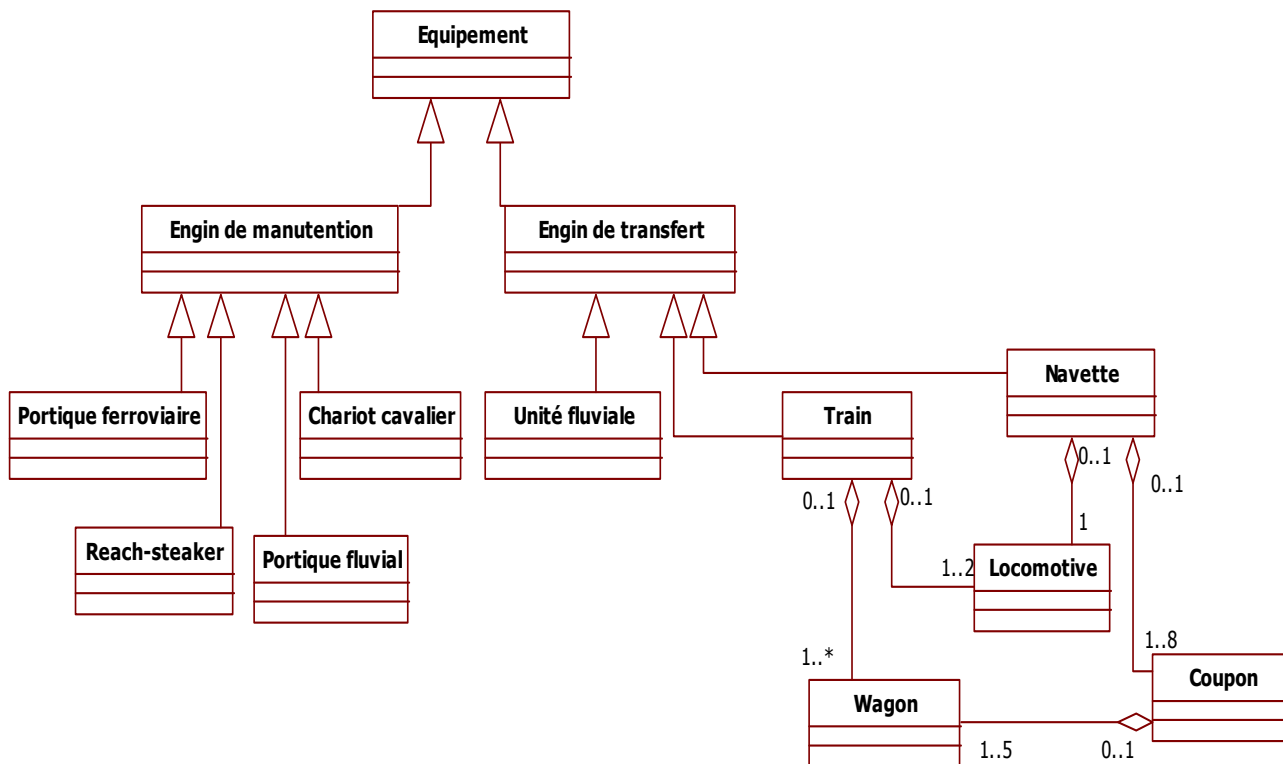


Figure V.8. Des classes du package Technologie

Il s'agit d'un diagramme qui présente les différentes relations entre les classes appartenant à un même package. La figure V.8 illustre les classes du package technologie.

b) Diagramme de classe « inter » : ce diagramme d'« inter relation » présente les différentes relations entre les classes des différents packages, figure V.9. Par exemple :

- Un terminal à conteneurs contient un ou plusieurs engins de manutention ;
- Un Docker peut charger ou décharger un ou plusieurs conteneurs ;
- Un agent de manœuvre peut décharger un ou plusieurs coupons ;
- Zéro ou plusieurs conteneurs peuvent être stocké(s) dans un buffer.

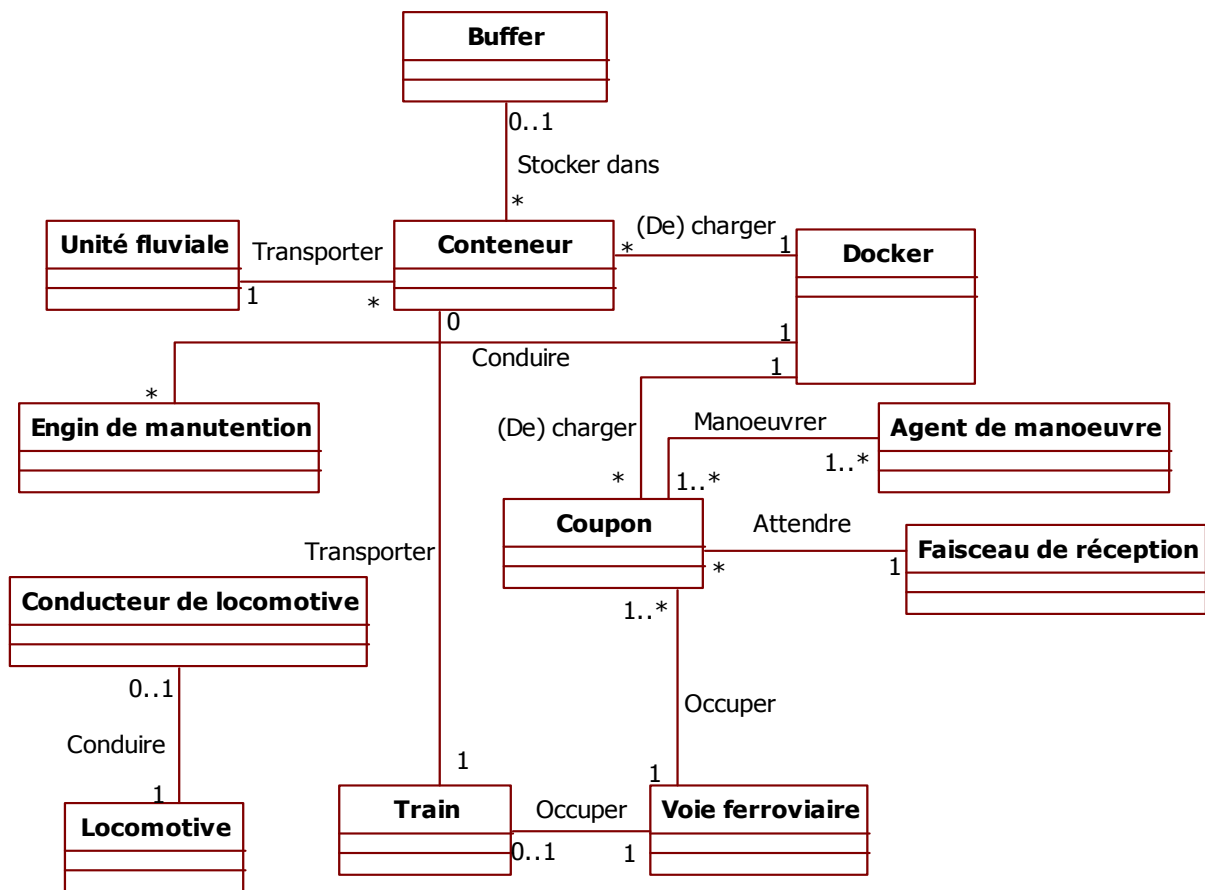


Figure V.9. Extrait du diagramme Inter relation

c) Diagramme de classe « Relations externes » : dans ce diagramme (Figure V.10), nous avons montré les différentes relations entre notre système de simulation et les autres systèmes d'information externes qui gèrent les différents trafics au sein du port du Havre.

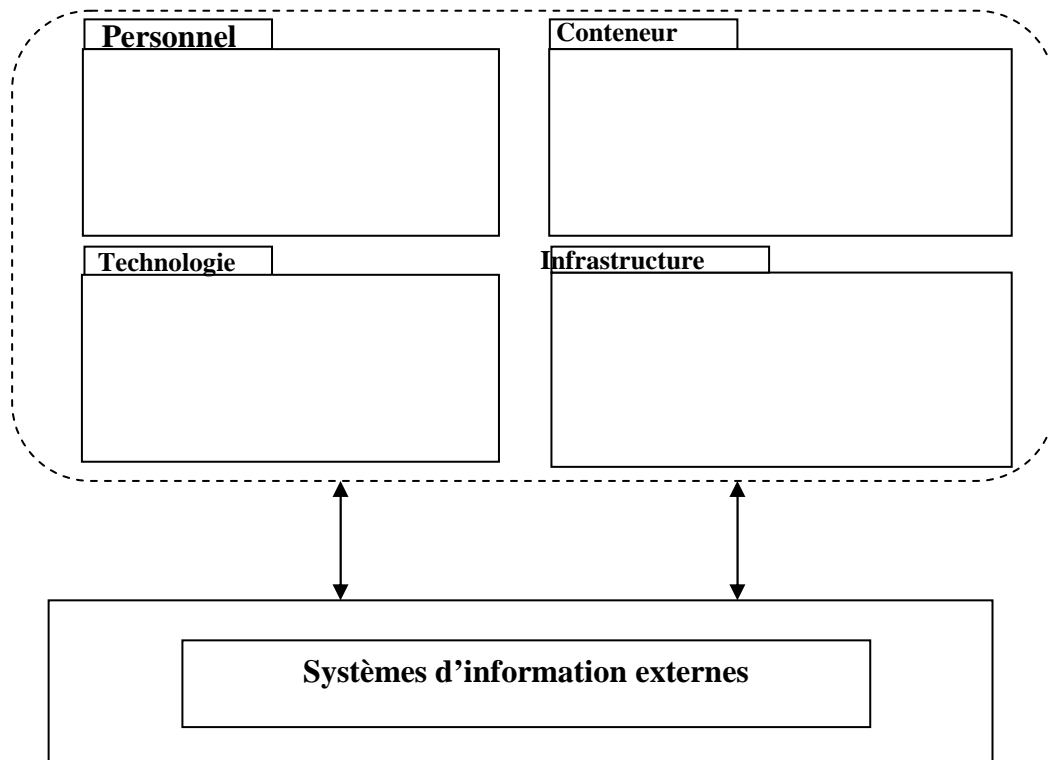


Figure V.10. Prototype du diagramme de classes « Relation externes »

3.5.3. Objets de gestion et de coordination

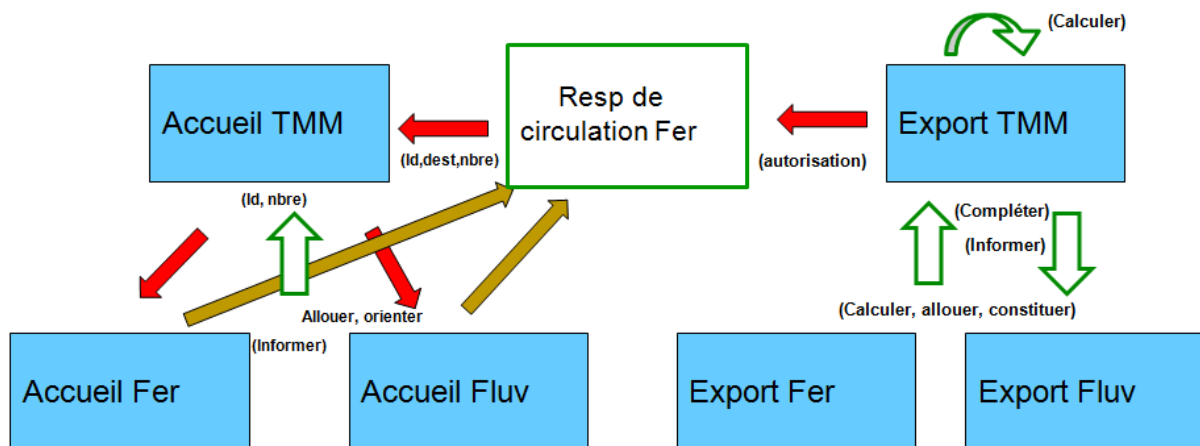


Figure V.11. Objets de gestion au niveau du terminal multimodal

Après avoir modélisé l'aspect structurel de notre système, nous avons par la suite identifié des objets de coordination (Figures V.11 et V.12), afin de gérer les différents objets qui composent le système. Ces derniers ont pour mission la coordination, afin d'assurer la gestion des trajets des navettes. Leurs tâches principales consistent à réserver, gérer les voies et les engins nécessaires pour l'accueil et le départ des navettes.

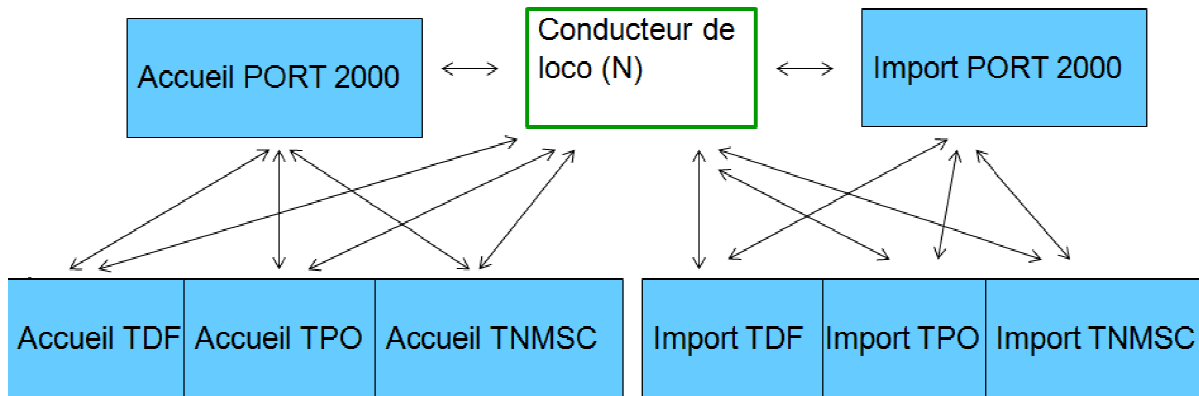


Figure V.12. Objets de gestion au niveau du terminal port 2000

Ci-dessous, ne sont présentés que les objets de gestion affectés au terminal multimodal. Concernant les autres terminaux, il s'agit du même comportement avec des noms adaptés aux lieux concernés :

- **Accueil TMM** : l'objet « Accueil TMM » est en relation d'une part avec la locomotive et d'autre part avec les deux objets « Accueil Fer » et « Accueil Fluv ». Sa tâche principale consiste à communiquer avec la locomotive et dispatcher les messages reçus (d'une navette ou d'un train de grandes lignes) avant son arrivée au TMM. Il diffuse le message à l'objet qui correspond au type de la navette (fer et/ou fluv). Il doit également s'assurer que le nombre de voies est disponible sinon il doit orienter la navette ou le train au faisceau de réception
 - ✓ **Accueil Ferroviaire** : sa mission commence dès qu'il reçoit le message de l'objet « Accueil TMM ». En effet, selon l'information, il doit allouer les ressources nécessaires à l'accueil de la navette ou du train afin de commencer la manutention. Ensuite une fois que la navette ou le train est sur la voie, il remplacera la locomotive par le locotracteur qui s'occupera du déplacement des coupons vides au faisceau de réception. En fin de manutention, il doit libérer les ressources et informer l'objet accueil TMM.
 - ✓ **Accueil Fluvial** : sa mission commence dès qu'il reçoit le message de l'objet « Accueil TMM ». En effet, selon l'information il doit allouer les ressources nécessaires à l'accueil de la navette ou de la barge afin de commencer la manutention. Ensuite, une fois que la navette est sur la voie, il remplacera la locomotive par le locotracteur qui s'occupera du déplacement des coupons vides au faisceau de réception. En fin de manutention, il doit libérer les ressources et

informer l'objet « Accueil TMM ».

- **Export TMM** : l'objet « ExportTMM » est en relation avec la locomotive et le responsable de la circulation ferroviaire d'une part, et d'autre part, avec les deux objets « Export Fer » et « Export Fluv ». Sa mission consiste à coordonner les deux objets « Export Fer » et « Export Fluv » afin de compléter la navette. Une fois que la navette est complète, la prochaine étape consiste à allouer la voie principale en contactant le responsable de la circulation ferroviaire et informer la locomotive.

✓ **Export Ferroviaire** : c'est l'objet qui s'occupe de la préparation de la navette avant de contacter l'objet « Export TMM ». Sa mission consiste à définir le nombre de conteneurs à transférer, et ainsi allouer le nombre de ressources correspondant. Il doit également assurer la manutention et la constitution de la navette. Une fois la navette prête, il transmettra l'information contenant le nombre de coupons et la destination de la navette à l'objet « Export TMM ». Il doit également communiquer avec l'objet « Export TMM » dans le cas où il faut compléter une navette.

✓ **Export Fluvial** : c'est l'objet qui s'occupe de la préparation de la navette avant de contacter l'objet « Export TMM ». Sa tâche consiste à déterminer le nombre de conteneurs à transférer, et ainsi allouer les ressources nécessaires. Il doit ensuite, à l'aide des autres objets gérer la manutention et la constitution de la navette. Une fois la navette prête, il transmettra l'information contenant le nombre de coupons et la destination de la navette à l'objet « Export TMM ». Il doit également communiquer avec l'objet « Export TMM » dans le cas où il faut compléter une navette.

3.5.4. Diagrammes de séquence

Les diagrammes de cas d'utilisation modélisent à QUOI sert le système, en définissant les interactions possibles avec les acteurs. Les diagrammes de classes permettent de spécifier la structure et les liens entre les objets dont le système est composé : ils spécifient QUI sera à l'œuvre dans le système pour réaliser les fonctionnalités décrites par les diagrammes de cas d'utilisation. Les diagrammes de séquences permettent de décrire COMMENT les éléments du système interagissent entre eux et avec les acteurs.

Nous avons élaboré une cinquantaine de diagrammes de séquence. Le diagramme présenté dans la figure V.13 montre le séquençement de tâches pour assurer le transfert de la navette en import décrit précédemment. Dans ce diagramme, la navette part du terminal maritime Port 2000 « TDF » vers le terminal multimodal.

En premier, l'objet « Import TDF », selon le nombre de conteneurs à transférer, fait référence au diagramme de séquence « rapprocher ressources » ensuite « charger les conteneurs ». Une fois que la navette est prête, l'objet « Import PORT 2000 » doit s'assurer que la navette part complète, pour ceci il contacte les objets des terminaux voisins. Ensuite, la navette est complétée, la tâche suivante consiste à allouer la voie de circulation et l'objet « Accueil TMM » aura l'information concernant la destination de la navette et le nombre de wagons. L'objet « Accueil TMM » à son tour, envoie l'information à l'objet « Accueil Fer » et/ou à l'objet « Accueil Fluv », selon la destination de la navette. Enfin, la dernière étape consiste à rapprocher les ressources et démarrer la manutention.

Pour le cas du terminal Atlantique, il s'agit du même principe. L'objet « Import Atlantique », selon le nombre de conteneurs à transférer, fait référence au diagramme de séquence « rapprocher ressources » puis « charger les conteneurs ». Une fois que la navette est prête, l'objet « Import Terminaux Nord » doit s'assurer que la navette part complète, pour ceci, il contacte l'objet du terminal voisin. L'objet « Accueil TMM » aura l'information concernant la destination de la navette et le nombre de wagons. Il est chargé à son tour, d'envoyer cette information à l'objet « Accueil Fer » et/ou à l'objet « Accueil Fluv ». Enfin, la dernière étape consiste à rapprocher les ressources pour manutentionner la navette.

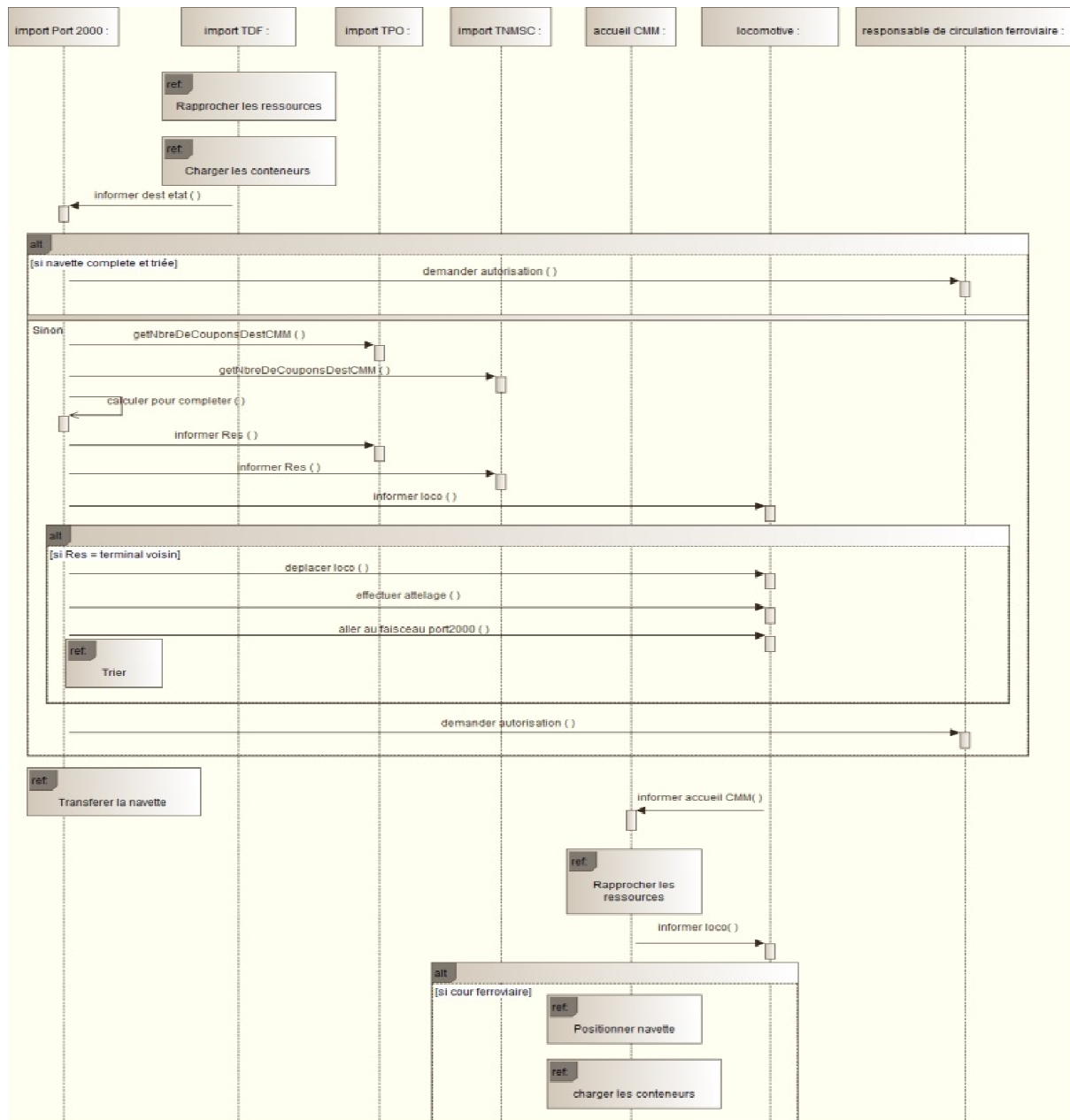


Figure V.13. Diagramme de séquence « Mission import de TDF vers le terminal multimodal »

4. CONTRIBUTION À L'AMÉLIORATION DE L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE

En élaborant et en analysant les diagrammes de séquence, nous avons constaté qu'ils représentent les contraintes à respecter avant d'agir sur le système en utilisant une variable de décision (variable d'action), chose qui est absente dans ECOGRAI. L'utilisation de la méthode ECOGRAI permet d'avoir une vue globale du fonctionnement du système, tout en identifiant les fonctions clés, ainsi que l'ensemble des indicateurs de performance liés à

chacune d'elles [Vincent, 2005]. Elle offre une démarche logique de modélisation par approche « descendante », permettant la définition des objectifs stratégiques en objectifs opérationnels. Toutefois, elle ne permet pas de suivre efficacement l'évaluation de la performance en utilisant les variables d'action. La méthode ECOGRAI permet d'identifier les variables de décision (d'action) et de vérifier leurs cohérences mais ne permet pas de déterminer les origines d'une déficience [Michel, 2009].

Par exemple, la variable d'action « Maximiser le remplissage des navettes en desservant les terminaux voisins » qui consiste à desservir les terminaux voisins, est utile dans certains modes de transfert. Sa mise en œuvre, nécessite plusieurs vérifications et manœuvres : car une navette ferroviaire n'est pas autorisée à accéder à un terminal si elle transporte des conteneurs destinés à un terminal voisin. Ces contraintes sont exprimées dans les diagrammes de séquence. Ceci permet de considérer le diagramme de séquence comme un support d'aide afin de vérifier le respect de contraintes avant d'exécuter les variables d'action. Nous proposons donc d'ajouter à la phase des variables d'action, une étape permettant d'utiliser les diagrammes de séquence pour fournir un support efficace lors de la modification du système.

5. CONCLUSION

La méthode ECOGRAI permet d'analyser la cohérence du système dans son ensemble grâce à ses différentes étapes. Elle consiste à établir un lien entre les éléments du triplet « objectif – variable de décision – indicateur de performance ».

En s'appuyant sur les limites de la méthode ECOGRAI, il s'avère qu'elle ne permet pas :

- d'exprimer les relations entre les actions à effectuer alors qu'elles concernent la même organisation et donc elles sont dépendantes ;
- de répondre à la question comment utiliser les variables de décision, comment piloter et quelles sont les conditions à vérifier avant d'effectuer une telle modification sur le système ?

Donc, la méthode ECOGRAI n'offre pas une étape permettant de guider le décideur jusqu'au bout et de définir des actions performantes.

Afin de répondre à ces limites et améliorer la démarche ECOGRAI, nous avons proposé notre démarche dénommée ECOGRAISIM. Elle s'appuie sur la simulation des processus et son objectif consiste à la modélisation et à l'évaluation de la performance de la chaîne portuaire. En effet, elle consiste à appliquer les quatre premières étapes de la méthode

ECOGRAI afin de déterminer les indicateurs de performance et ensuite utiliser la simulation pour calculer et mesurer les indicateurs de performance obtenus.

Après avoir défini les indicateurs de performance, le comportement général du système a été décrit sous forme de diagrammes de cas d'utilisation, de classe et de séquence avec, pour chacun d'entre eux, leurs interrelations, leurs attributs et leurs règles de gestion.

Dans le chapitre suivant nous nous intéressons à ces indicateurs de performance. Nous utilisons la simulation pour proposer plusieurs modes de transfert de conteneurs entre les terminaux du port du Havre et évaluer leurs performances.

CHAPITRE VI : SIMULATION DE TRANSFERT FERROVIAIRE DE CONTENEURS

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	114
2. PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE ET ENJEUX	114
3. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE SIMULATION	117
3.1. Présentation de FLEXSIM	117
3.2. Présentation de la bibliothèque Rail API	118
3.3. Implémentation.....	119
4. SCÉNARIOS DE SIMULATION	122
4.1. Modes de transfert Massifié/Planifié.....	123
4.2. Mode de transfert Optimisé.....	127
4.2.1. Résultats numériques du mode optimisé.....	132
5. MODE OPTIMISÉ : PRISE EN COMPTE DE TOUS LES TERMINAUX	138
6. VALIDATION DU MODÈLE.....	144
7. CONCLUSION	145

1. INTRODUCTION

La performance de la chaîne logistique portuaire dépend de la pertinence des décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles [Steenken et al, 2004 ; Kim, 2008 ; Henesey, 2006]. Nos recherches portent sur l'évaluation de la performance de différents modes de transfert ferroviaire de conteneurs entre les terminaux du port du Havre afin d'augmenter la fluidité des conteneurs en réduisant les coûts et les émissions de CO₂.

Typiquement, nous nous intéressons à la performance de la massification du transport des conteneurs via le terminal multimodal du Havre. L'objectif du terminal multimodal est d'augmenter la part modale des transports massifiés qui est très en retrait en France par rapport aux ports concurrents du nord de l'Europe. La multimodalité permet d'offrir une compétitivité accrue ainsi qu'un plus grand respect de l'environnement par l'utilisation moindre du mode routier. En effet, d'un point de vue écologique, l'objectif est la diminution du trafic routier en utilisant plus le transport ferroviaire et fluvial. Le transfert de conteneurs entre les terminaux maritimes et le terminal multimodal du Havre, facteur clé de la compétitivité du port, est assuré par des navettes ferroviaires. Par ailleurs, pour assurer une meilleure fluidité de trafic de conteneurs il faut savoir adapter le flux aux moyens existants.

Notre but est d'obtenir un processus d'exploitation performant du terminal multimodal au regard des indicateurs de performance définis dans le chapitre précédent à savoir le taux d'occupation des ressources, le taux de service en fonction du nombre de conteneurs livrés à temps et le nombre de mouvements improductifs. La mesure des indicateurs de performance ainsi que l'évaluation de la performance sont réalisées par simulation des différents modes de transfert.

2. PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE ET ENJEUX

Le terminal multimodal est conçu pour accueillir des conteneurs par navettes ferroviaires depuis différents sites d'expédition de fret tels que les terminaux maritimes, les zones industrielles et logistiques. Il comprend des espaces et des moyens de manutention pour effectuer le transfert des conteneurs sur les barges et sur les trains de grandes lignes et éventuellement un stockage provisoire.

Le périmètre d'étude comprend le Terminal Atlantique, le Terminal De France (TDF), le Terminal de la Porte Océane (TPO) et les Terminaux de Normandie de Mediterranean Shipping Company (TNMSC). Ces terminaux sont reliés via une liaison ferroviaire au terminal multimodal (Figure VI.1).

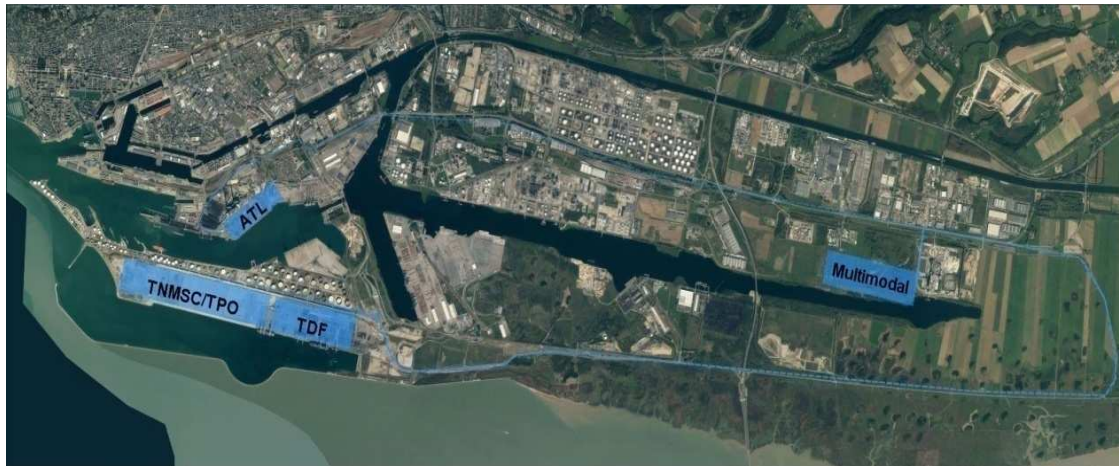


Figure VI.1. Plan du port du Havre

En import, les conteneurs sont reçus au niveau d'un terminal maritime et sont ensuite récupérés depuis la zone de stockage. Pour assurer le transfert vers le terminal multimodal, il faut positionner une navette, charger les conteneurs, atteler une locomotive et ensuite faire partir la navette. A l'arrivée au terminal multimodal, la navette sera guidée selon sa destination : plateforme ferroviaire, plateforme fluviale ou les deux plateformes et la disponibilité des voies (sinon elle doit attendre au niveau du faisceau de réception). La navette doit attendre sur la voie s'il n'y a pas de grue disponible.

En export, les conteneurs seront reçus au niveau du terminal Multimodal et transférés à un terminal maritime suivant les étapes citées en import.

La figure VI.2 présente les différentes étapes liées à une opération de transfert depuis un terminal maritime jusqu'au terminal multimodal.

Les processus de manutention et de transfert de conteneurs par navettes ferroviaires ont été modélisés en UML (voir le chapitre précédent). La modélisation concerne les processus de composition des navettes qui assurent le transfert de conteneurs entre les terminaux, les processus des manœuvres ferroviaires pour le déplacement des navettes et les processus de chargement et de déchargement des unités de transport (Barges, Trains de grandes lignes, Navettes ferroviaires).

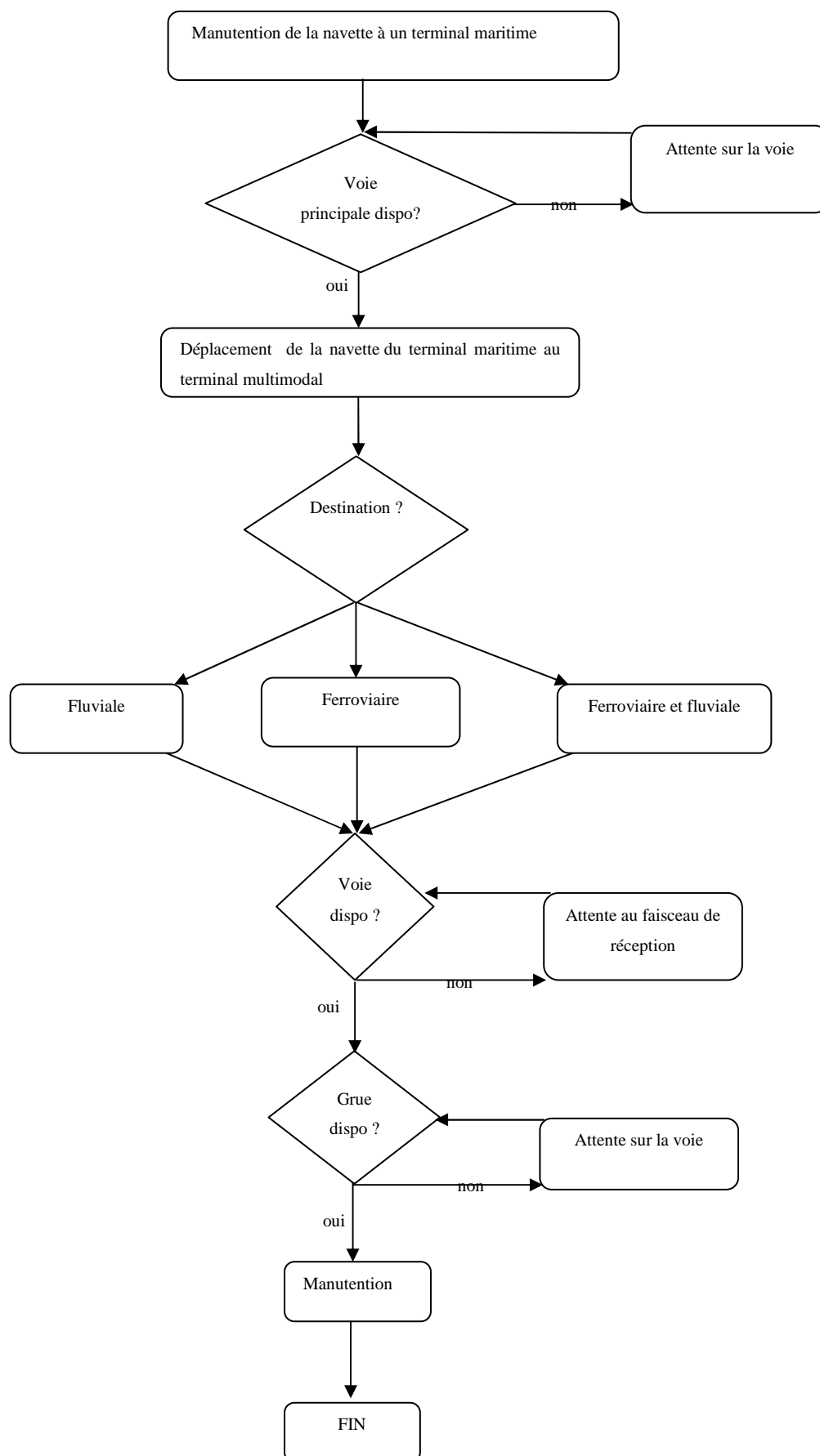


Figure VI.2. Processus de transfert de conteneurs

3. DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE SIMULATION

Pour développer un système de simulation, dans le marché, plusieurs outils de simulation sont disponibles. Le tableau VI.1 montre une comparaison entre les différents logiciels souvent utilisés [Sun et al, 2011].

Outils de simulation de flux	Caractéristiques
Anylogic	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D • Langage de programmation : Java
Arena	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D, • Langage de programmation : Visual Basic • échange de données avec Microsoft EXCEL
Automod	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D • Langage de programmation : Automod
Plant simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D • Langage de programmation : Simtalk
ExtendSim	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D • Langage de programmation: Modl
<i>Flexsim</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D, • Langage de programmation : C++ • Librairie <u>Flexsim CT</u> « Pour les Terminaux à Conteneurs »
ProModel	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D • Langage de programmation : ProModel
Witness	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D • Langage de programmation : Witness
DelmiaQuest	<ul style="list-style-type: none"> • Interface graphique : 2D + 3D • Langage de programmation : C++

Tableau VI.1. Outils de simulation (Source [Sun et al, 2011])

Pour réaliser notre modèle de simulation à événements discrets, nous avons utilisé le logiciel FLEXSIM et plus particulièrement FLEXSIM CT (Container Terminal) conçu spécialement pour modéliser et simuler l'évolution du flux physique à l'intérieur d'un port.

3.1. Présentation de FLEXSIM

FLEXSIM Software Products a été fondé par Bill Nordgren, Roger Hullinger et Cliff King en 1993 sous le nom de F&H simulations. En 2000, le nom de la société change pour devenir FLEXSIM.

FLEXSIM offre de grandes possibilités de réutilisation de développement et la présentation en mode 3D. Il s'agit d'un outil orienté objet conçu pour la modélisation et la simulation des flux des conteneurs dans les terminaux portuaires et des processus de passages portuaires grâce à sa bibliothèque CT (Container Terminal). La programmation se fait en C++ ou en Flescript. Chaque objet de FLEXSIM a sa propre interface utilisateur graphique (GUI) à travers laquelle sa modélisation est effectuée.

Toutefois, FLEXSIM CT ne permet pas la réalisation des voies ferrées. En effet, il traite seulement les opérations au sein du terminal maritime et il ne permet pas la création des chemins de fer. Nous avons utilisé une bibliothèque développée spécialement pour le transport ferroviaire.

3.2. Présentation de la bibliothèque Rail API

La Rail API, développée par Anthony Johnson en 2008, permet d'implémenter les mouvements articulés pour les wagons. La bibliothèque est surtout un ensemble de commandes qui donne la possibilité de créer des trains et de les déplacer à travers les chemins d'un réseau ferré. L'API permet la gestion du trafic ferroviaire et le contrôle du déplacement des navettes. Voici les principales fonctions de cette API que nous avons utilisées :

`Creatrailsequence ()` : permet de créer et de renvoyer une référence à une séquence de rail. Une séquence de rail est un ensemble d'opérations : se déplacer / envoyer un message / retarder / attendre. Ces opérations sont effectuées sur un ensemble d'objets (travelers). Ainsi, une séquence de rail permet le déplacement d'un ensemble de wagons sur un réseau ferroviaire d'un point A vers un point B.

`Creatrailpath ()` : pour la création des chemins de fer.

`Addrailmove ()` : pour le déplacement d'une navette depuis un nœud du réseau vers un autre, elle doit être paramétrée par la vitesse, l'accélération, la décélération, le point de départ et le point d'arrêt.

`Addrailmessage ()` : pour l'échange de messages entre les objets. Par exemple, à l'arrivée d'une navette sur un lieu de manutention, l'objet engin de manutention reçoit un message pour commencer la manutention et à la fin il renvoie un message pour libérer les autres ressources impliquées et prendre la tâche suivante.

Les différentes fonctions de la RailAPI permettent d'ajouter des actions à une séquence créée par la fonction `creatrailsequence` à savoir : les mouvements, les délais d'attente, les

pauses et les envois de messages par l'intermédiaire des fonctions *addrailmove*, *addraildelay*, *addrailwait* et *addrailsendmessage*, etc.

3.3. Implémentation

Dans le logiciel FLEXSIM, nous retrouvons les objets décrits dans la modélisation UML sur laquelle nous nous sommes appuyés pour implémenter les ressources de notre modèle (Figure VI.3) :

- Les zones de stockage (Yard) : bien que FLEXSIM CT ne permet pas d'insérer l'objet yard sans la planification de l'arrivée/départ d'un bateau ou d'un camion, nous avons modélisé une zone de stockage par un rack horizontal.
- Les portiques de stockages des conteneurs (Gantry Crane) : comme l'objet « Gantry Crane » ne fonctionne qu'avec un yard, nous avons utilisé l'objet grue (crane) qui fonctionne comme un portique.
- Un conteneur : en utilisant l'objet « Basic TE ».
- Des wagons et des rails: en utilisant la librairie API Rail.

FLEXSIM dispose aussi de la présence de "triggers" sur certains objets, déclencheurs réagissant aux différents événements survenant sur l'objet concerné. Le modèle, lui aussi, dispose de déclencheurs spécifiques. Ces déclencheurs contiennent du code écrit en langage Flexscript.

Nous avons implémenté les objets de gestion décrits dans le chapitre précédent. Ils ont pour mission la gestion des différentes tâches comme la manutention, la gestion des voies ou celle des déplacements des navettes. L'utilisation du principe des objets de coordination a aussi été motivée par le fait que FLEXSIM se base principalement sur l'envoi de messages ; cela permet de pouvoir établir une communication entre les différents objets rendant plus facile la coordination des différentes actions.

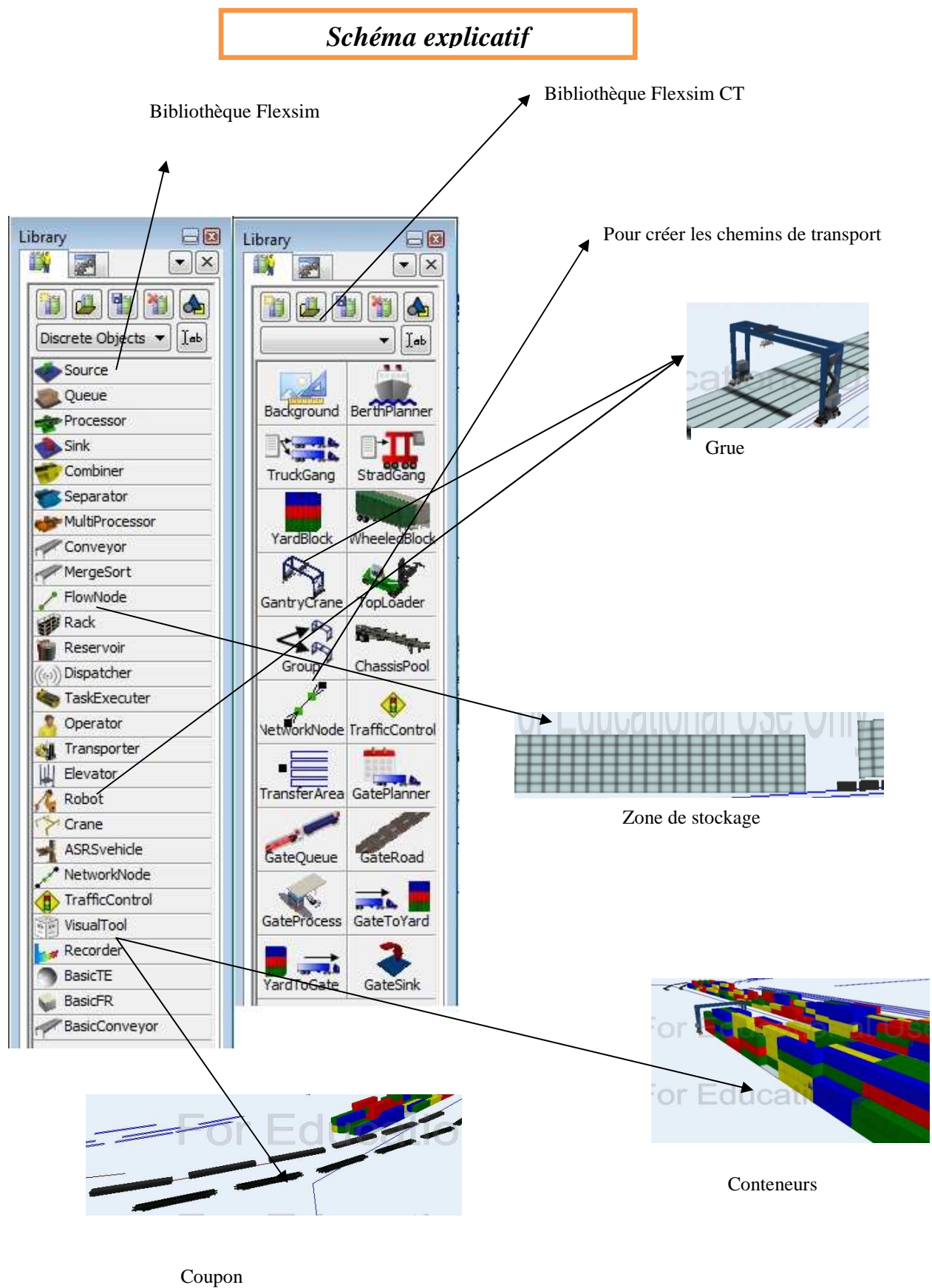


Figure VI.3. Schéma explicatif

Le modèle de simulation réalisé (Figure VI.4) contient le terminal multimodal et l'ensemble de terminaux maritimes concernés. En effet, le terminal multimodal est composé d'un faisceau de réception, d'une cour ferroviaire pour manutentionner les trains de grandes lignes, d'une cour fluviale pour manutentionner les barges et de voies de liaisons sur lesquelles circule un locotracteur.

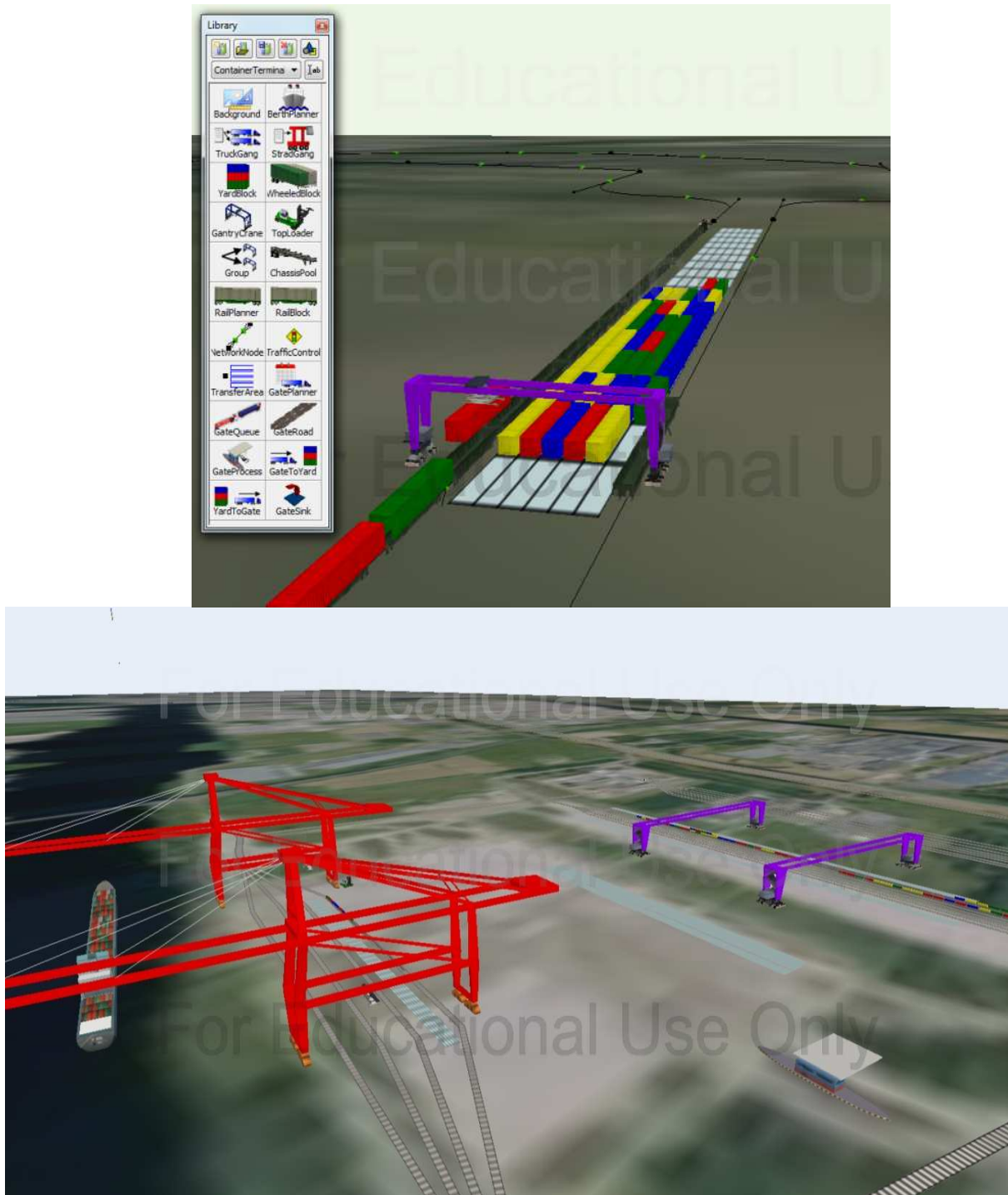


Figure VI.4.Captures d'écran de notre simulation

a. Faisceau de réception

Il est entièrement électrifié. Ainsi, les trains de grandes lignes peuvent s'y rendre directement. La locomotive est dételée pour se rendre à une voie garage. Un locotracteur attèle les wagons et les transfère à la cour ferroviaire. En sens inverse, une fois que le train est rechargé, la locomotive de ligne arrive directement sur la cour ferroviaire dont la tête de faisceau est électrifiée, s'attèle aux wagons et le train peut repartir directement sans passer par le faisceau de réception. Si les navettes ne peuvent pas se rendre directement sur la cour ferroviaire ou sur la cour fluviale, elles s'arrêtent sur le faisceau de réception. Les rames (une rame est un ensemble de coupons sans une locomotive) sont alors redistribuées sur la cour ferroviaire et fluviale par le locotracteur. En sens inverse le principe est le même.

b. Cour ferroviaire

La cour ferroviaire est composée de 8 voies en parallèle. Elle est équipée de deux portiques ferroviaires pour manutentionner les conteneurs des trains vers les navettes et vice-versa. La répartition des trains et des navettes sur la cour ferroviaire est paramétrable. Pour mieux gérer les trains de lignes arrivant au multimodal, une priorité est affectée à chaque train en tenant compte des délais de livraison impartis aux conteneurs qu'ils transportent.

c. Cour fluviale

Quatre voies sont utilisées sous le portique pour le déchargement et le chargement des conteneurs import export des navettes.

d. Terminaux maritimes à conteneurs

Les terminaux maritimes implémentés sont : Terminal Atlantique, Terminal De France (TDF), Terminal de la Porte Océane (TPO) et Terminaux de Normandie de Mediterranean Shipping Company (TNMSC). Dans le cadre des deux projets ESSIMAS, DCAS, la simulation se limite aux buffers des terminaux maritimes.

4. SCÉNARIOS DE SIMULATION

Dans [Benghalia et al, 2013], les indicateurs de performance sont déterminés en se basant sur la démarche ECOGRAISIM dont l'intérêt de cette démarche est d'avoir les variables d'action liées à la fois à ces indicateurs et aux objectifs. Il s'agit donc d'évaluer les indicateurs de performance déterminés et de tester plusieurs modes de transfert interne des conteneurs. Nous avons ensuite mené une étude [Benghalia et al., 2014] pour comparer via la simulation deux modes d'exploitation : mode planifié et mode massifié. Le but principal de

cette première simulation est de gérer le flux de conteneurs transférés entre le terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique en respectant les dates de livraison et en minimisant les coûts des ressources utilisées.

4.1. Modes de transfert Massifié/Planifié

L'objectif consiste à simuler le transfert ferroviaire de conteneurs entre le terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique afin de comparer deux scénarios de transfert en import et en export. Il ne s'agit pas de dimensionnement de ressources sachant que le nombre de ressources est fixé.

En import, les conteneurs sont reçus au niveau du terminal maritime Atlantique. Notre objectif est de les récupérer depuis la zone de stockage, positionner la navette et manutentionner les conteneurs, atteler une locomotive et ensuite lancer le transfert de la navette vers le terminal multimodal, et décharger les conteneurs une fois au multimodal. En fin de trajet, la locomotive doit être libérée pour exécuter d'autres tâches.

En export, les mêmes tâches citées en import se répètent, les conteneurs seront reçus au niveau du terminal multimodal et doivent être transférés au terminal maritime afin de les livrer à leurs destinations finales.

Nous considérons deux scénarios :

- Scénario 1 : appelé mode planifié, il consiste à respecter les dates de livraison des conteneurs; en effet, notre système lance la manutention des conteneurs qui ont la même heure de départ.
- Scénario 2 : consiste à appliquer le principe du mode massifié : la navette ne partira pas si le taux de remplissage fixé n'est pas atteint.

En respectant les contraintes de temps et le nombre de ressources imposées, il s'agit d'effectuer une étude comparative de ces deux modes d'exploitation par rapport à la minimisation des retards, la réduction des coûts et des émissions de CO₂. Il s'agit également de la minimisation de l'écart entre la date de livraison prévue et la date de livraison au plus tard. L'étude a été menée en respectant les règles de gestion suivantes :

- Il n'y a qu'une seule destination possible au terminal multimodal (on ne prend pas en compte le fait qu'il y ait un faisceau de réception, une cour ferroviaire et une cour fluviale).
- Il n'y a qu'un seul buffer (zone de stockage) sur chaque terminal

- Le transfert des conteneurs peut être assimilé à une succession d'opérations de « production » nécessitant un certain temps et un certain nombre de ressources.

Après l'insertion et le paramétrage du plan du port du Havre et des différents objets ainsi que la création des deux lignes ferroviaires entre le terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique, un fichier Excel alimente le modèle avec les données (numéros de conteneurs, types de conteneurs et heures de disponibilité).

Nous avons utilisé trois locomotives. Le trajet entre les deux terminaux dure 60 minutes, le temps de manœuvre est de 30 minutes pour une rame de 25 wagons, le temps de manutention est de 3 minutes par conteneur et le taux de remplissage nécessaire pour le départ d'une navette est fixé à 80%.

La simulation des deux scénarios planifié et massifié, concerne une journée type. Les indicateurs de performance à analyser sont le taux d'occupation des ressources, le taux de déplacements improductifs, le nombre de conteneurs transférés en retard et le nombre de conteneurs livrés.

Objet	Classe	Déplacements chargé	Déplacements à vide
Crane 1	Crane	5.42 %	5.70 %
Crane 2	Crane	6.66 %	7.34 %

Tableau VI.2. Rapport d'état pour le mode planifié

Le tableau VI.2 montre le pourcentage d'utilisation et le pourcentage d'inoccupation ou de blocage des grues de quai. Ainsi, nous pouvons mesurer les indicateurs de performance « taux de déplacements improductifs » et « taux d'occupation ».

L'indicateur de performance « taux d'occupation des engins de manutention » représenté dans le tableau, montre que les grues sont utilisées entre 11% et 14%. La grue « crane1 » du terminal multimodal est utilisée à 11.12% dont 5.70% de déplacement vide (sans conteneur) et 5.42% de déplacement chargé. Au niveau du terminal maritime Atlantique, la grue « crane2 » est utilisée à 14% dont 7.34% à vide et 6.66% chargé.

Durant la simulation, nous avons constaté qu'une locomotive a effectué un trajet sans wagons depuis le terminal multimodal vers le terminal Atlantique. Ce qui montre que le taux d'occupation des ressources n'est pas maximisé et ceci présente un inconvénient majeur du mode planifié.

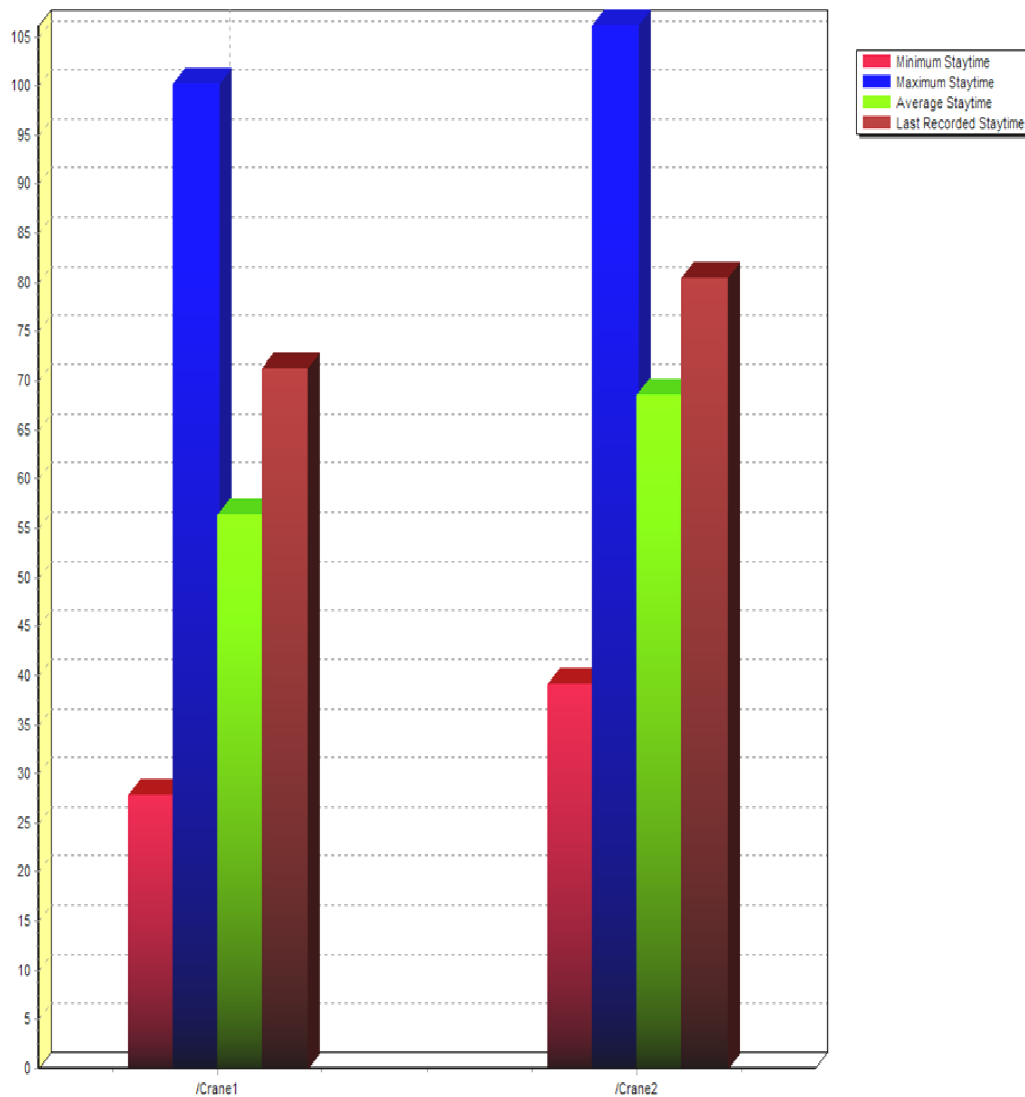


Figure VI.5. Taux d'occupation des engins de manutention (mode planifié)

Le principe du mode massifié est de respecter le taux de remplissage des navettes. La navette ne part pas avant d'atteindre 80% de remplissage. Ceci permet de maximiser le taux d'utilisation des ressources et plus précisément de maximiser le taux d'utilisation des locomotives qui sont les plus coûteuses. Nous constatons qu'il y a une diminution au niveau du taux d'occupation des grues. En effet, le taux d'occupation varie entre 9% et 11%. La grue « crane1 » du terminal multimodal est utilisée à 9.46% dont 4.79% de déplacement vide (sans conteneurs) et 4.67% de déplacement chargé. Alors que la grue « crane2 » du terminal maritime Atlantique est utilisée à 10.94% dont 5.58% à vide et 5.36% chargé (Tableau VI.3), (Figure VI.6).

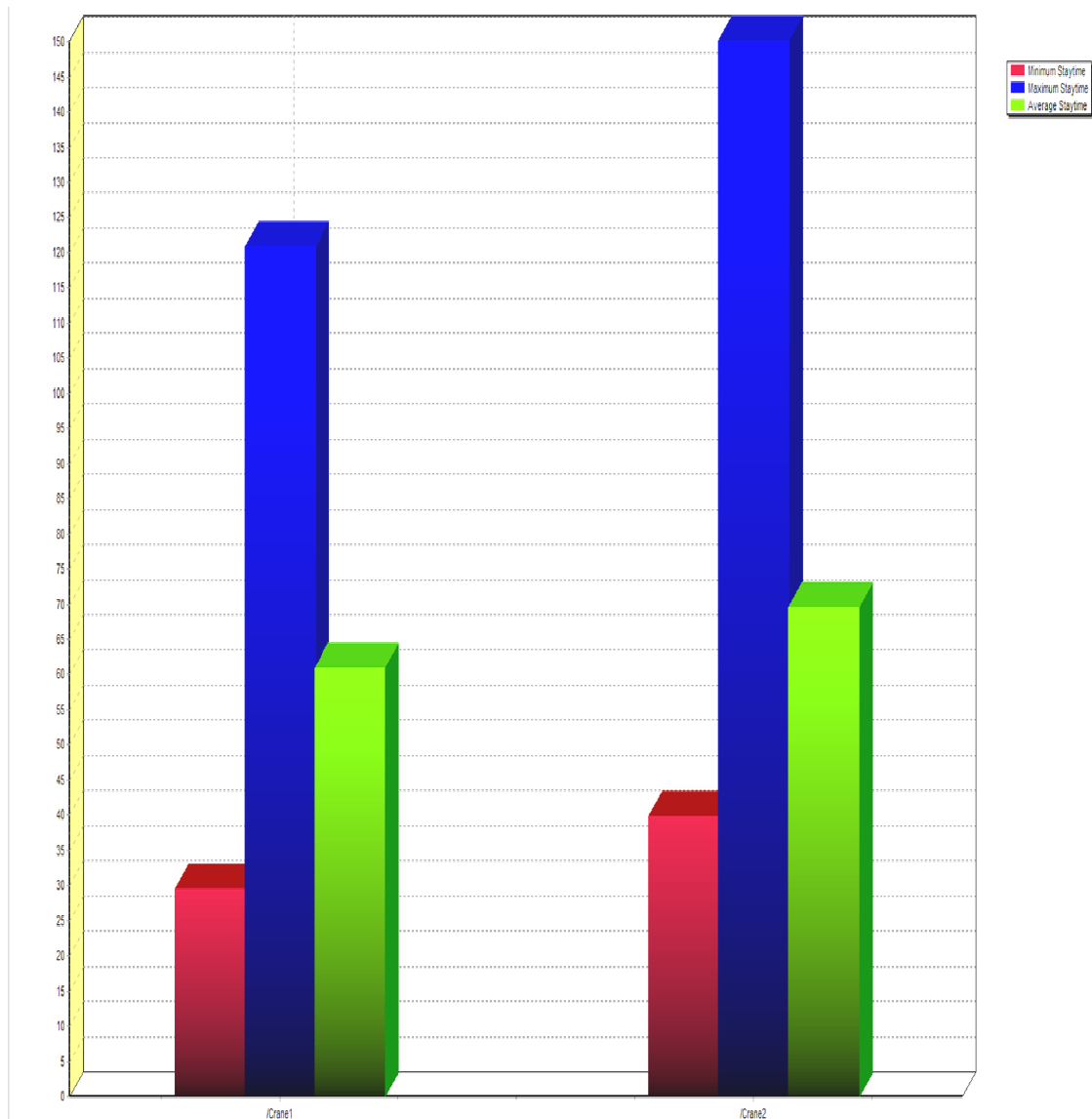


Figure VI.6. Taux d'occupation des engins de manutention (mode massifié)

Objet	Classe	Déplacements chargé	Déplacements à vide
Crane 1	Crane	4.67 %	4.79 %
Crane 2	Crane	5.36 %	5.58 %

Tableau VI.3. Rapport d'état pour le mode massifié

Pour les deux modes d'exploitation massifié et planifié, le nombre de conteneurs à transférer depuis le terminal Multimodal vers le terminal Atlantique et vice versa est égale au nombre transféré en fin de simulation, c'est à dire 165 conteneurs. En mode planifié, la dernière navette est arrivée sans retard. Ceci permet d'assurer que tous les conteneurs sont transférés et à l'heure. L'avantage de ce mode d'exploitation concerne l'indicateur de performance « nombre de conteneurs transférés en retard ». Il permet d'assurer zéro conteneur transféré en retard en fin de journée. En mode massifié, il y a des conteneurs qui sont livrés en

fin de journée (dernière navette) alors qu'il fallait les livrer à 15h. Ce retard est dû au taux de remplissage.

En comparant les deux modes d'exploitation massifié et planifié, nous avons déduit qu'en mode planifié, le taux d'occupation des engins de manutention est meilleur tandis que le taux d'occupation des locomotives est meilleur dans le mode massifié. Il faut savoir que le taux d'occupation des ressources a un effet direct sur la minimisation des coûts et l'optimisation du temps de travail. Réduire le pourcentage de CO₂ implique forcément la minimisation du nombre de trajets, des mouvements improductifs et la maximisation du taux d'occupation. Concernant le taux de service du mode planifié (nombre de conteneurs livrés à temps/nombre de conteneurs livrés), il est meilleur par rapport à celui du mode massifié. Par contre, le fait de ne pas partir avant d'atteindre 80% de remplissage génère un retard considérable en fin de journée.

La simulation des deux modes massifié et planifié a montré que le mode planifié permet d'avoir un meilleur taux de service. Le mode planifié est également meilleur pour la réduction des émissions de CO₂. Le mode massifié est meilleur économiquement car il permet de transférer les conteneurs en utilisant moins de ressources (locomotives) qui sont très coûteuses.

4.2. Mode de transfert Optimisé

La force de la simulation est sa capacité à décrire un système dans sa globalité en intégrant l'aspect stochastique [Bielli et al., 2006]. Néanmoins, les valeurs optimales de ses variables de décision sont difficiles à déterminer. [Better et Glover, 2008] ont couplé l'optimisation et la simulation afin de gérer les risques et les incertitudes. Dans [Almeder et al., 2009], le couplage de l'optimisation et la simulation vise à déterminer les variables de décision de la simulation en utilisant l'optimisation. Les résultats de la simulation alimentent l'optimisation qui en retour détermine les variables de décision de la simulation et ainsi de suite. Nous avons aussi fixé les variables de décision de la simulation via l'optimisation.

Plusieurs motivations nous amènent à faire la combinaison optimisation/simulation. La première est de tester la robustesse des solutions trouvées par l'optimisation qui génère une bonne solution à partir de données statiques. Cependant, un certain nombre de paramètres aléatoires intervient dans le réel et ces aléas peuvent dégrader une solution. Les paramètres aléatoires sont par exemple le nombre de conteneurs à livrer ou à collecter, les temps de séjour des conteneurs dans le terminal, etc. La simulation vise donc dans un premier temps à

tester la robustesse d'une solution trouvée par les algorithmes d'optimisation dans un environnement aléatoire.

La deuxième motivation est de fournir un outil d'aide à la décision permettant de tester plusieurs planifications possibles. Ainsi, suite à une simulation, il est possible d'apercevoir des défauts d'une configuration et d'en déduire des corrections sur certains choix stratégiques. Suite à ces corrections, de nouvelles simulations peuvent être lancées jusqu'à l'obtention de la bonne configuration. Nous proposons donc un système (Figure VI.7) composé de deux modules: un module d'optimisation capable de fournir une bonne solution de planification des transferts des conteneurs et un module de simulation capable d'évaluer cette planification.

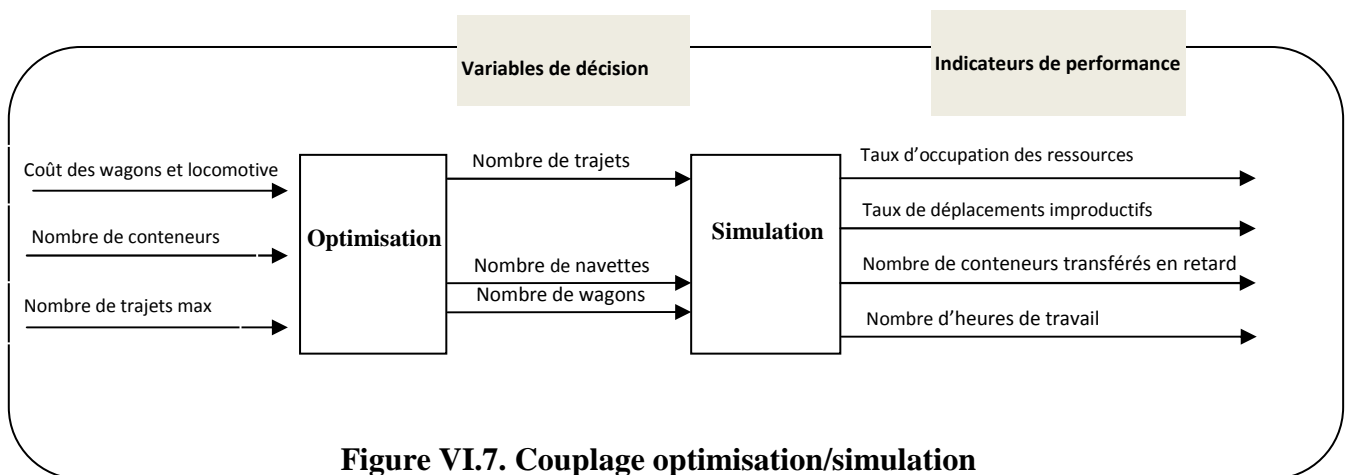


Figure VI.7. Couplage optimisation/simulation

Notre objectif est d'étendre nos travaux précédents [Benghalia et al., 2014a] afin de proposer un nouveau mode de transfert optimisé de conteneurs. Il s'agit de simuler le transfert ferroviaire de conteneurs en utilisant des variables de décision fixées par l'optimisation et les différents choix fonctionnels (nombre de locomotives, nombre de wagons, ordonnancement de trajets). Cette simulation permet de calculer les indicateurs de performance (taux d'occupation des ressources, taux de déplacements improductifs, nombre de conteneurs transférés en retard, nombre de conteneurs livrés) qui ont été déterminés dans [Benghalia et al., 2013]. Le but principal de notre étude est de déterminer la stratégie la moins coûteuse pour le transfert d'un ensemble de conteneurs entre deux terminaux à conteneurs. La minimisation du coût concernera, en l'occurrence, la minimisation du nombre de wagons des navettes assurant le transfert d'une part et la minimisation du nombre d'aller-retour pour la locomotive d'autre part. Nous avons réalisé un premier modèle de simulation FLEXSIM [Benghalia et al., 2014a] afin de comparer les deux modes d'exploitation : mode planifié et mode massifié. Les deux modes simulés (massifié/ planifié) nécessitent l'utilisation de plusieurs ressources, entre autre, trois locomotives qui sont très coûteuses. Pour pallier à cet

inconvenient, nous avons adopté une stratégie d'exploitation optimisée [Benghalia et al, 2014b]. Plus précisément, pour que la manutention des navettes s'effectue sans mobiliser les locomotives, nous préparons des navettes manutentionnées sur chaque terminal. Les locomotives font le transfert ininterrompu entre le terminal multimodal et les terminaux maritimes sous forme d'un schéma de circulation en noria i.e. lorsque la locomotive arrive au terminal maritime (resp. au terminal Multimodal), elle laisse sa navette et elle prend la navette déjà manutentionnée. (Figure VI.8).

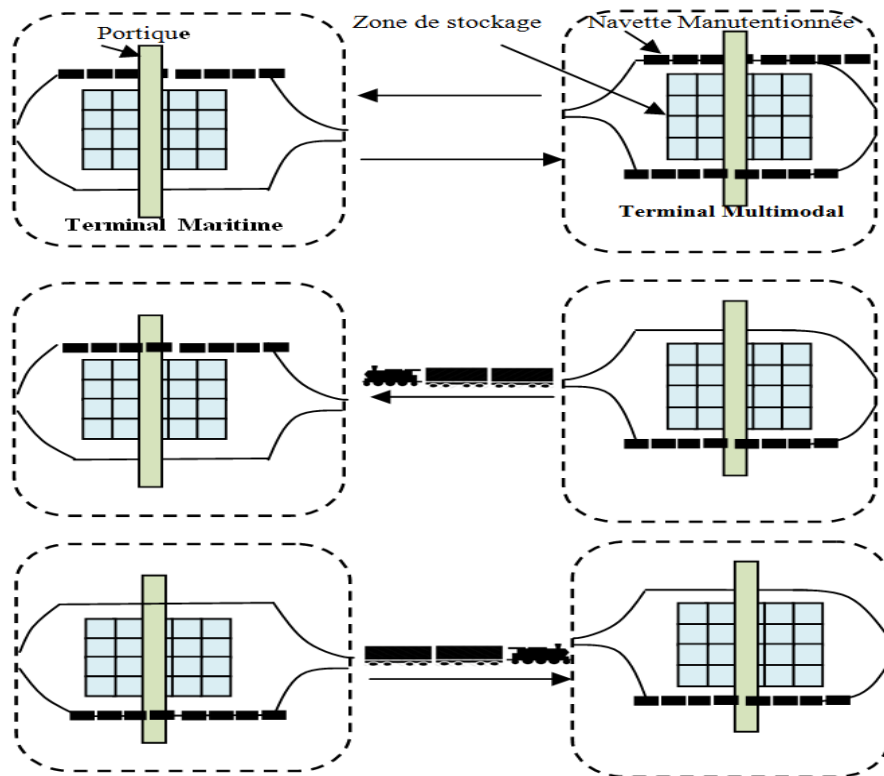


Figure VI.8. Schéma de circulation en Noria

La simulation est alimentée par des données issues d'un fichier Excel qui contient pour chaque conteneur : l'heure de disponibilité, l'identifiant, son type, son terminal de départ et son terminal d'arrivée.

Le but de notre premier modèle de simulation était de transférer les conteneurs depuis le terminal multimodal vers le terminal Atlantique (export) et vice-versa (import) en testant plusieurs scénarios (mode massifié et mode planifié). Les variables de décision, le nombre de locomotives, le nombre de wagons et le nombre de trajets, ont été grossièrement fixées par estimation. Pour pallier à cet inconvénient, nous avons opté pour l'optimisation afin de fixer d'une manière optimale ces variables.

Pour optimiser le nombre de conteneurs import/export, le nombre de wagons de chaque navette et le nombre de trajets d'une locomotive, nous présentons ci-dessous notre formulation mathématique P_1 :

Données :

C_l : Coût de la locomotive par heure

C_w : Coût de location d'un wagon

R : Ensemble des navettes

NR : Nombre maximal de retours des navettes

NA : Nombre maximal d'allers des navettes

TR : Taille maximale des navettes

T_0 : Taille minimale d'une navette

NCX : Nombre de conteneurs en export

NCI : Nombre de conteneurs en import

Variables de décisions :

d_i : Dimension de la navette i

a_i : Nombre d'allers de la navette i , du terminal Multimodal au terminal Atlantique

r_i : Nombre de retours de la navette i , du terminal Atlantique au terminal Multimodal

La fonction objectif :

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in R} C_w d_i + \sum_{i \in R} C_l (a_i + r_i)$$

Nous cherchons à minimiser le coût d'utilisation des wagons (premier terme) et le coût des trajets effectués par la locomotive (deuxième terme).

Contraintes :

$$\sum_{i \in R} a_i d_i \geq NCX \quad (1)$$

$$\sum_{i \in R} r_i d_i \geq NCI \quad (2)$$

Ces contraintes assurent que le nombre de déplacements effectués par les navettes dimensionnées sera suffisant pour le transfert des conteneurs (en import et en export)

$$T_0 \leq d_i \leq TR, \forall i \in R \quad (3)$$

La contrainte (3) limite la taille des navettes. En effet, la limitation des tailles des navettes est due à des considérations du réseau ferré-portuaire, à savoir la longueur limitée des faisceaux de réception à l'entrée de chaque terminal, et aux contraintes liées à l'utilisation de certains engins de manutention (les chariots-cavaliers en particulier).

$$1 \leq a_i \leq NA, \forall i \in R \quad (4)$$

$$1 \leq r_i \leq NR, \forall i \in R \quad (5)$$

Les contraintes (4) et (5) limitent le nombre de déplacements pour chaque navette. En effet, une locomotive ne peut faire qu'un nombre limité de trajets par jour pour des considérations de ressources humaines (2 shifts travaillés par journée)

$$0 \leq |r_i - r_j| \leq 1, \forall i, j \in R \quad (6)$$

$$0 \leq |a_i - a_j| \leq 1, \forall i, j \in R \quad (7)$$

$$0 \leq |a_i - r_j| \leq 1, \forall i, j \in R \quad (8)$$

Ces contraintes expriment la rotation des navettes, en effet les navettes se permutent entre aller, retour et manutention sur le terminal maritime et le terminal multimodal. Plus précisément, du fait que les navettes font le transfert suivant un schéma en noria ; une rame fera soit autant de déplacement que les autres ou plus ou moins un déplacement que les autres rames.

La contrainte (9) est une contrainte d'intégrité sur les variables.

$$d_i \in N^*, a_i \in N^*, r_i \in N^*, \forall i \in R \quad (9)$$

Le modèle présenté est un programme mathématique en nombre entier avec des contraintes quadratiques. Si la matrice associée à la forme quadratique des contraintes (1), (2) n'est pas semi définie positive, aucun solveur standard ne peut résoudre ce programme mathématique.

Pour cette raison, nous avons transformé le programme mathématique initial P_1 en un programme à variables $\{0, 1\}$ en écrivant chaque variable entière sous forme de somme de puissance de 2.

En effet, pour les variables entières de P_1 :

$$\exists (p, q, r) / \begin{cases} 1 \leq d_i \leq 2^{p-1} \\ 1 \leq a_i \leq 2^{q-1} \\ 1 \leq r_i \leq 2^{r-1} \end{cases}$$

$$\text{Telles que } \begin{cases} d_i = \sum_{k=0}^{p-1} 2^k u_{ik} \\ a_i = \sum_{k=0}^{q-1} 2^k w_{ik} \\ r_i = \sum_{k=0}^{r-1} 2^k v_{ik} \end{cases}$$

$$\text{Avec } (u_{ik}, v_{ik}, w_{ik}) \in \{0,1\}$$

En remplaçant les variables de décision entières dans les contraintes (1) et (2), nous obtenons un programme 0-1 à contraintes quadratiques. Enfin, avec la propriété suivante, nous obtenons un programme linéaire mixte P_2 que nous résolvons avec CPLEX :

$$\text{Pour } (x, y) \in \{0,1\}, z = x \cdot y \Leftrightarrow \begin{cases} z \leq x \\ z \leq y \\ z \geq x + y - 1 \\ z \geq 0 \end{cases}$$

Les instances du programme mathématique P_2 ainsi que les données du problème au format *LP* (format standard des programmes linéaires) sont téléchargeables grâce au lien suivant :

https://www.dropbox.com/s/dr90hjt看m0bhk6v/instances_Mosim.rar

4.2.1. Résultats numériques du mode optimisé

Le solveur CPLEX a pu résoudre toutes les instances du problème, les valeurs de la fonction objectif pour les instances sont données dans le tableau VI.4 :

Les colonnes 1 et 2 donnent le nombre de conteneurs en export et en import respectivement, la colonne 3 donne la valeur de la fonction objectif calculée à partir des valeurs approximatives des coûts de circulation de la locomotive et de location de wagons pour l'exploitation actuelle et la colonne 4 donne les temps de résolution. Le trafic (nombre de conteneurs) considéré dans les instances correspond à la part du trafic journalier par mode ferroviaire du terminal Atlantique qui est de l'ordre de 10 % du trafic ferroviaire global du Port du Havre dans un horizon de 20 ans. Les coûts donnés par l'optimisation ne prennent pas en compte l'amortissement des infrastructures ni les coûts des ressources humaines.

L'algorithme implémenté est rapide sachant que l'augmentation du nombre du trafic n'entraîne pas nécessairement l'augmentation du temps de résolution car ce dernier est lié à la structure et à la complexité temporelle du problème pour l'instance considérée.

	Nombre de conteneurs export/jour	Nombre de conteneurs import/jour	Valeur de l'objectif (€)	Temps de calcul (secondes)
Instance 1	40	50	263	0.38
Instance 2	70	40	323	0.38
Instance 3	70	70	323	0.38
Instance 4	80	20	341	0.8
Instance 5	100	60	383	0.78
Instance 6	120	80	413	1.21
Instance 7	140	100	521	2.33
Instance 8	180	120	633	2.34
Instance 9	220	140	745	2.44
Instance 10	260	160	865	2.56
Instance 11	320	180	964	2.48
Instance 12	380	200	1023	2.98
Instance 13	460	220	1248	2.96
Instance 14	540	240	1302	3.01
Instance 15	540	260	1574	3.05

Tableau VI.4. Résultats de la méthode d'optimisation

La simulation du mode optimisé concerne une journée type ainsi que l'utilisation d'une seule locomotive. Le trajet entre les deux terminaux dure 60 minutes et le temps de manutention est de 3 minutes par conteneur. Les valeurs des variables de décision pour l'instance 1 correspondent à 6 déplacements de la locomotive (un déplacement est un aller ou un retour) et 20 wagons au total pour le transfert de 90 conteneurs (somme des conteneurs export et import de l'instance 1).

La figure VI.8 illustre l'évolution des zones de stockage (le nombre de conteneurs est compris entre 24 et 50) des terminaux (ContentA en bleu : zone de stockage du terminal

Atlantique) et (ContentM en rouge : zone de stockage du terminal Multimodal). Nous constatons à partir de la figure VI.9 que la stratégie de rotation en noria des navettes a été respectée. En effet, chaque variation (augmentation ou diminution) du nombre de conteneurs (ContentA, ContentM) est due à une activité de chargement ou de déchargement de conteneurs. En plus, en fin de simulation, nous constatons que les valeurs de ContentA et ContentM ont été inversées, ce qui signifie que tous les conteneurs ont été transférés à temps. Par ailleurs, les valeurs finales de ContentA et ContentM permettent de calculer le critère de performance « taux de service » (le taux de service est le rapport du nombre de conteneurs transférés à temps sur le nombre total de conteneurs transférés).

En comparant les figures des trois modes simulés (Figures VI.9, VI.10 et VI.11), nous observons qu'il y a moins de variation au niveau des zones de stockage des terminaux (dans les figures VI.10 et VI.11, le nombre de conteneurs est compris entre 23 et 73). Cette variation est expliquée par l'utilisation du mode massifié (Figure VI.10). Néanmoins, ce mode génère des retards sur les délais de livraison des conteneurs alors que les deux autres modes ne génèrent pas de retard.

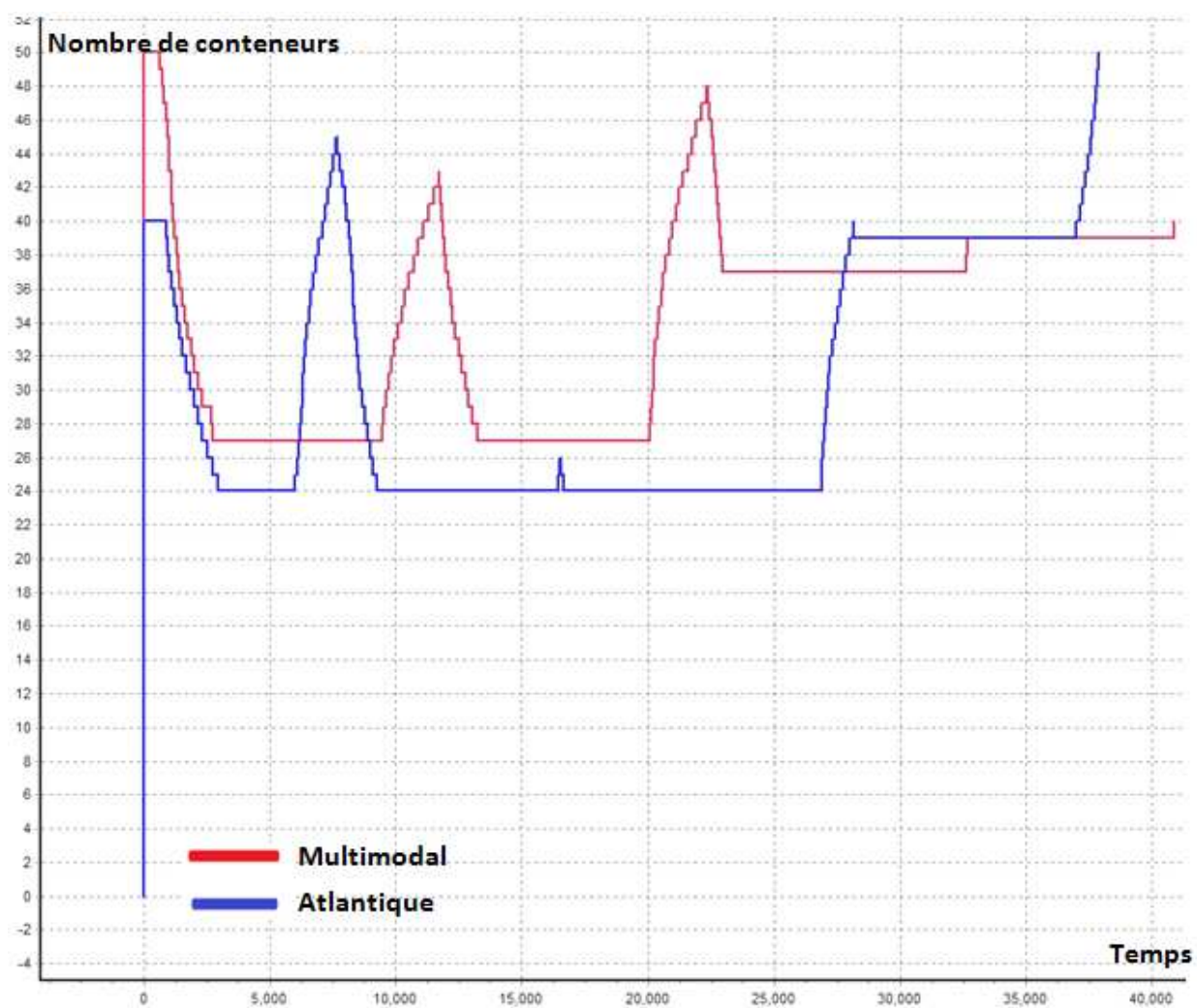


Figure VI.9. Circulation en mode de transfert optimisé

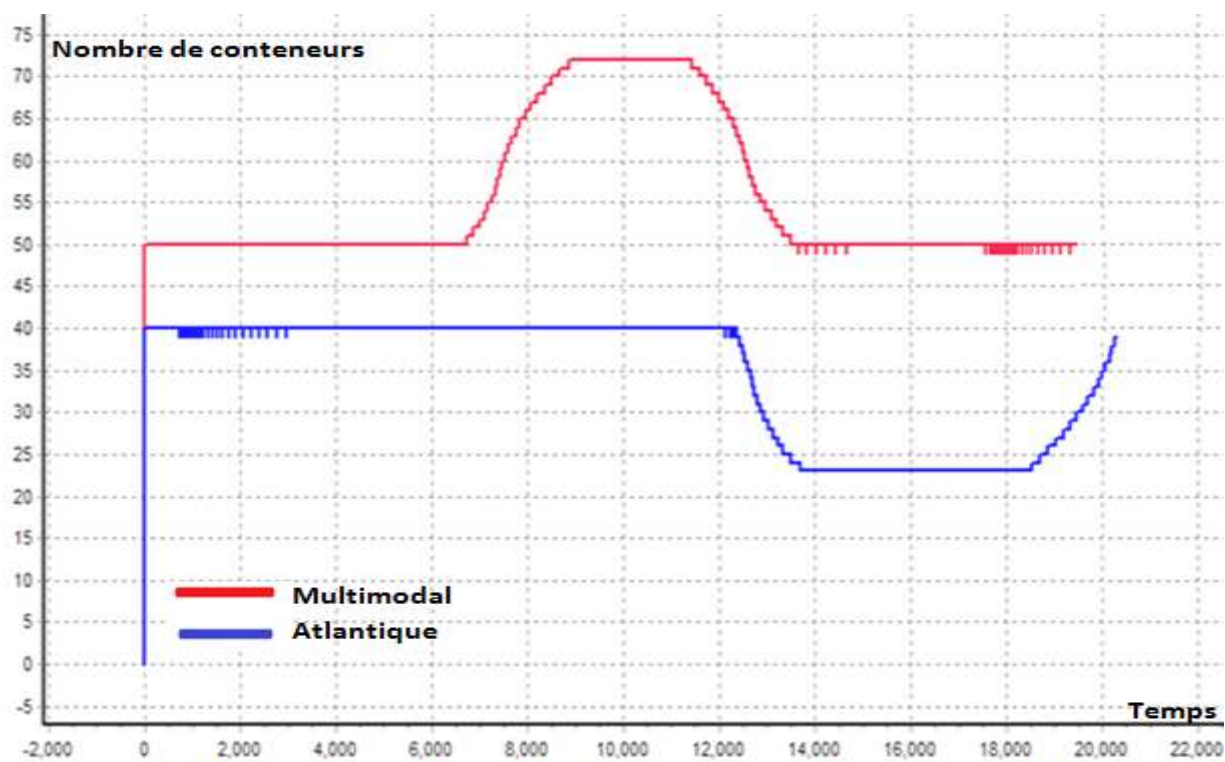


Figure VI.10. Circulation en mode de transfert massifié

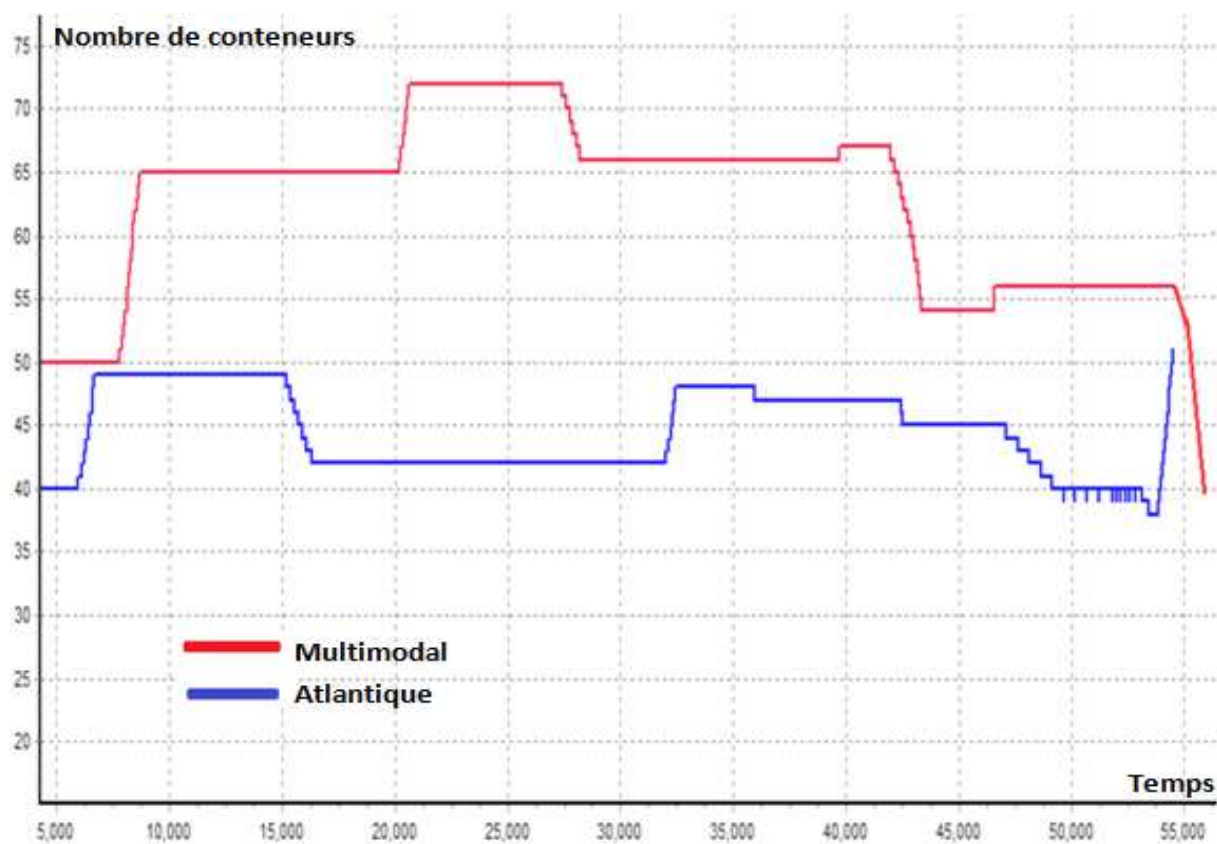


Figure VI.11. Circulation en mode de transfert planifié

Instances	Mode planifié			Mode massifié			Mode optimisé		
	Retard	CO ₂	Nombre de locomotives	Retard	CO ₂	Nombre de locomotives	Retard	CO ₂	Nombre de locomotives
1	0%	8	3	60%	3	2	0%	12	1
2	0%	8	3	30%	3	3	0%	14	1
3	0%	4	2	40%	3	2	0%	8	1
4	0%	5	3	60%	2	2	0%	8	1
5	0%	8	3	40%	2	3	0%	12	1
6	0%	6	3	40%	2	2	0%	10	1
7	0%	8	3	40%	3	2	0%	12	1

Tableau VI.5. Récapitulatif de l'analyse des instances

La comparaison des instances concernant les trois modes de transfert planifié, massifié et optimisé (Tableau VI.5) montre que les deux modes optimisé et planifié permettent d'avoir un meilleur taux de service car aucun conteneur n'est transféré en retard. Un des avantages du mode massifié est la réduction de l'émission de CO₂. Le mode massifié est mauvais sur des petites instances. D'un autre côté, le mode optimisé est meilleur économiquement car il permet de transférer les conteneurs en utilisant moins de ressources qui sont très coûteuses.

Après avoir étudié trois modes de transfert de conteneurs entre les terminaux, nous avons constaté que chaque mode a des avantages et des inconvénients mais le mode optimisé qui respecte le schéma de circulation en Noria, permet de réduire considérablement les coûts notamment au niveau du nombre de locomotives. Le mode massifié est suggéré fortement pour les grandes instances.

5. MODE OPTIMISÉ : PRISE EN COMPTE DE TOUS LES TERMINAUX

Cette simulation est alimentée par une interface graphique (Figure VI.12) qui se compose de plusieurs onglets permettant de contrôler la simulation et ses paramètres. Tout d'abord, l'onglet présentation fournit un bref descriptif rappelant les objectifs de la simulation et les différentes fonctionnalités de l'interface. L'onglet suivant est composé de 3 sous-onglets qui sont la gestion des conteneurs, du planning, ainsi que le dimensionnement et le placement des ressources. Le premier permet de varier le nombre de conteneurs qui devront être transférés d'un terminal à un autre. Celui gérant le planning permet de spécifier le scénario à simuler. Le dernier onglet de la partie configuration concerne le dimensionnement des navettes et leurs positions de départ.

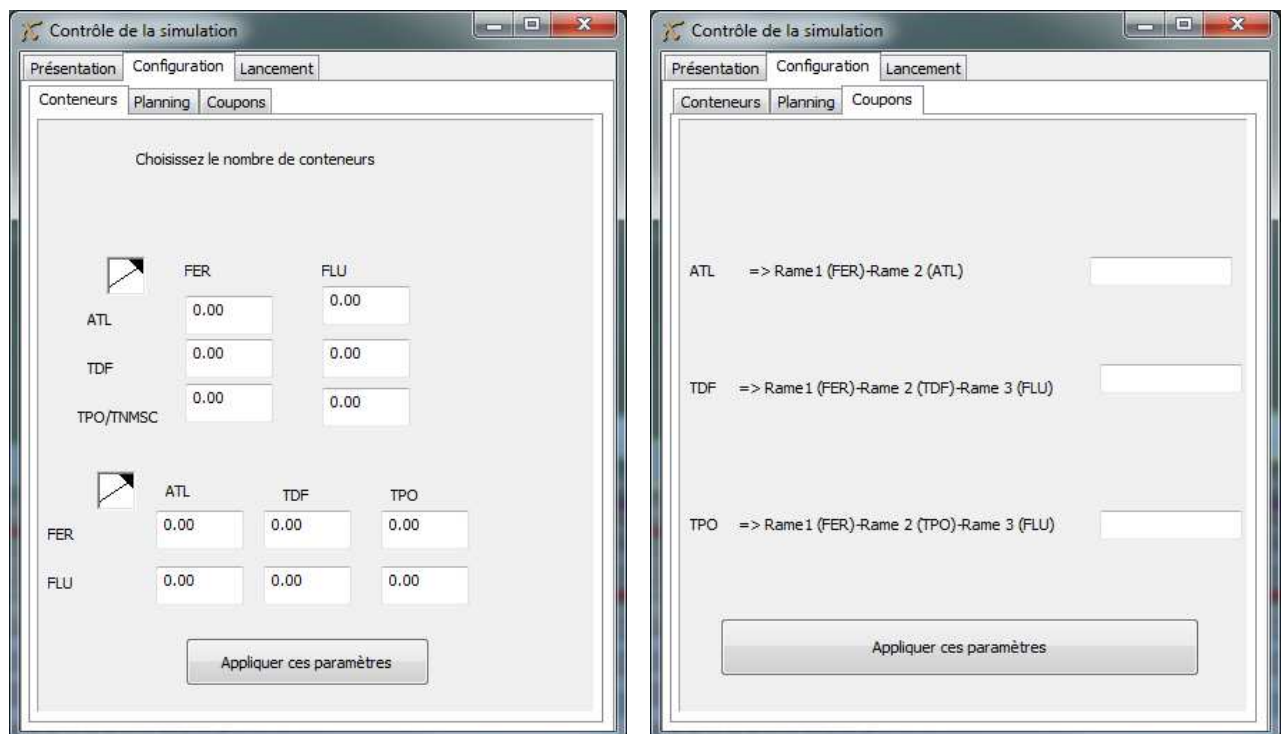


Figure VI.12. Interface graphique

Pour alimenter notre simulation, nous avons utilisé une méthode statistique développée dans le cadre du projet DCAS. Cette méthode respecte le principe de circulation en noria et fournit les différentes entrées nécessaires pour le fonctionnement de notre modèle de simulation :

- 3 rames pour TDF, 3 rames pour TPO/TNMSC, 2 rames pour Atlantique ;
- Scénario 1 : Mode de transfert optimisé (5-2-5) : 5 entrées pour TDF, 2 entrées pour Atlantique et 5 entrées pour TPO/PNMSC ;

- Scénario 2 : Mode de transfert optimisé (4-2-4) : 4 entrées pour TDF, 2 entrées pour Atlantique et 4 entrées pour TPO/PNMSC.

Nous avons également respecté les règles de gestion suivantes :

- Les trains emportent en général entre 20 et 60 conteneurs, les barges entre 100 et 200 conteneurs ;
- 2 locomotives et de 2 à 6 coupons par rames : en effet, le nombre de ressources utilisées a été déterminé par rapport à la journée la plus contraignante.

La simulation de ces deux scénarios a donné les résultats suivants :

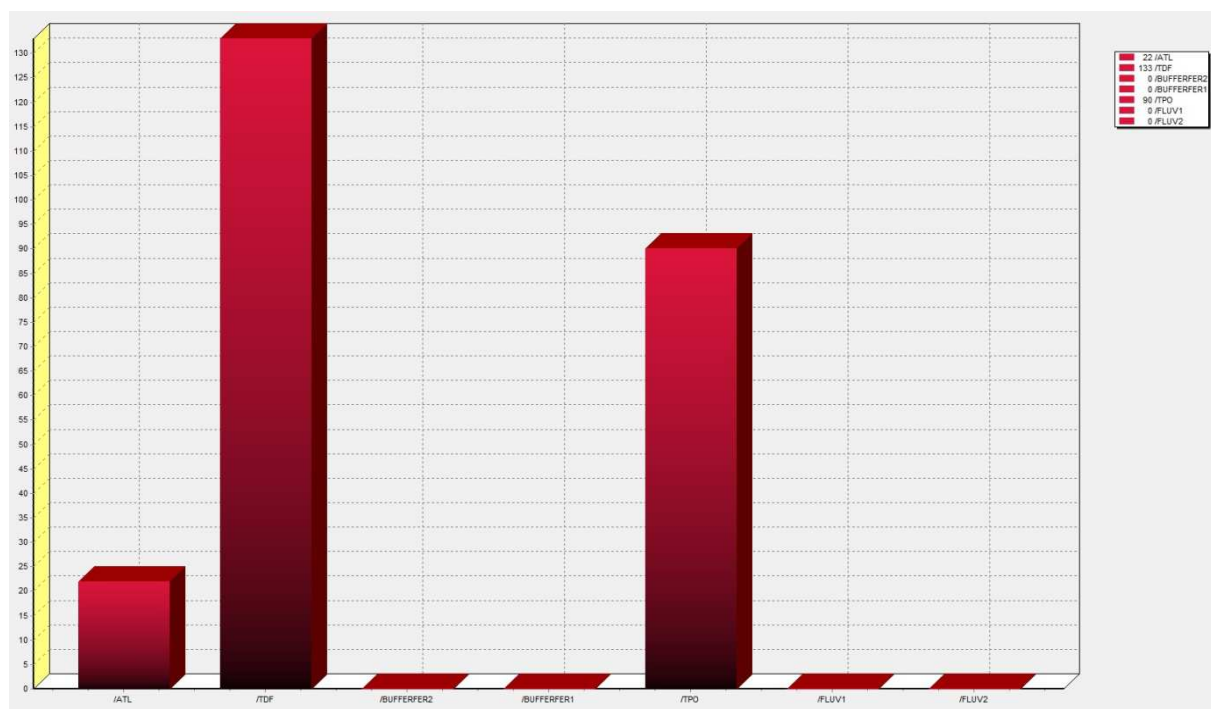


Figure VI.13. Nombre de conteneurs en fin de journée pour le scénario 4-2-4

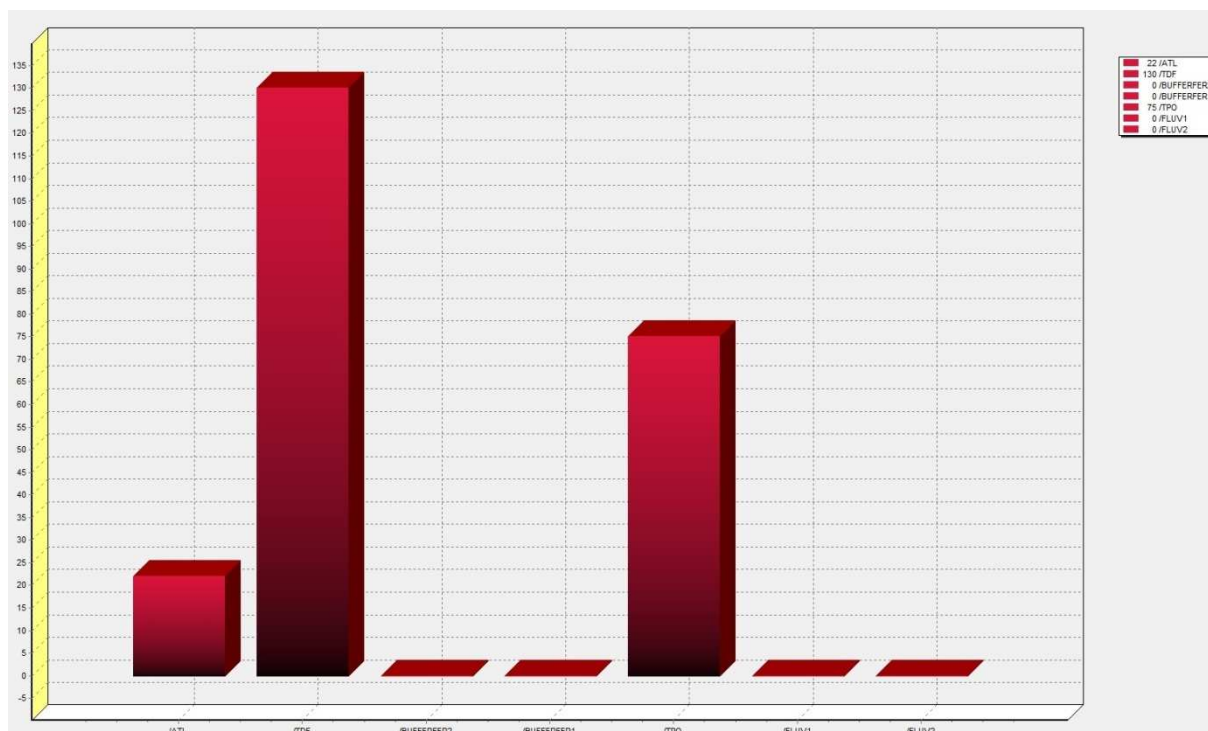


Figure VI.14. Nombre de conteneurs en fin de journée pour le scénario 5-2-5

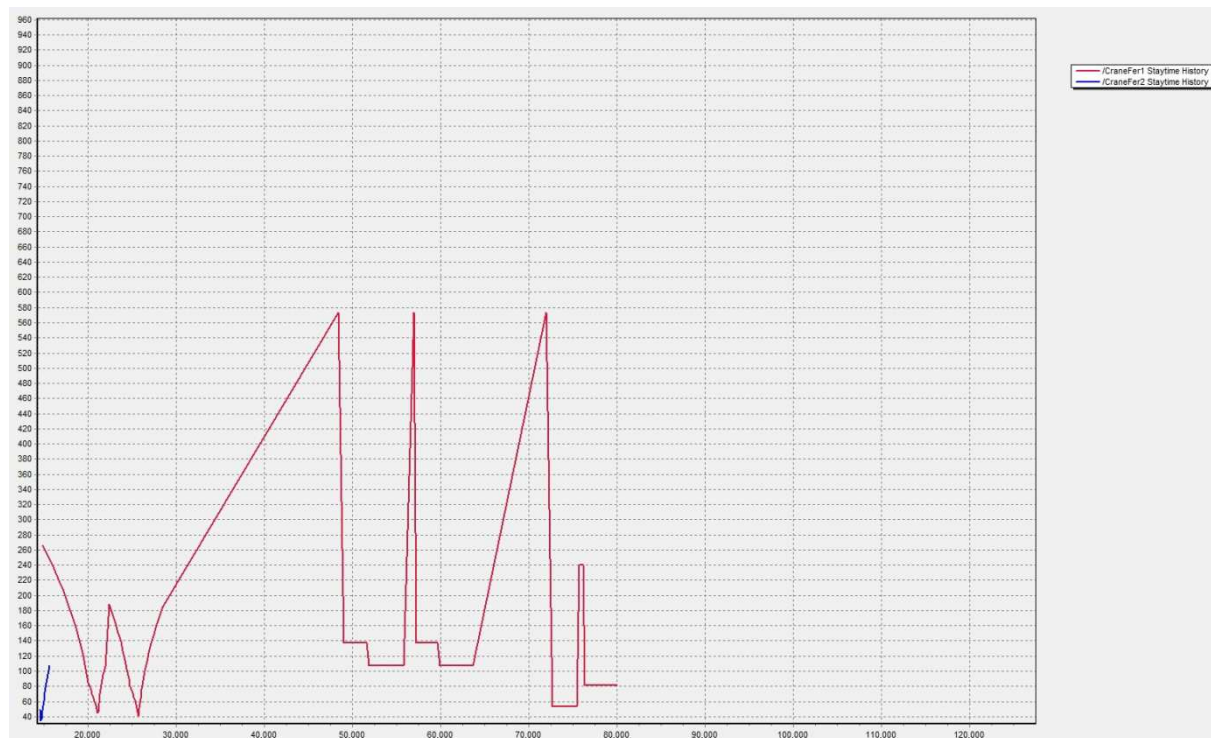


Figure VI.15. Taux d'utilisation des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 4-2-4.



Figure VI.16. Taux d'utilisation des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 5-2-5

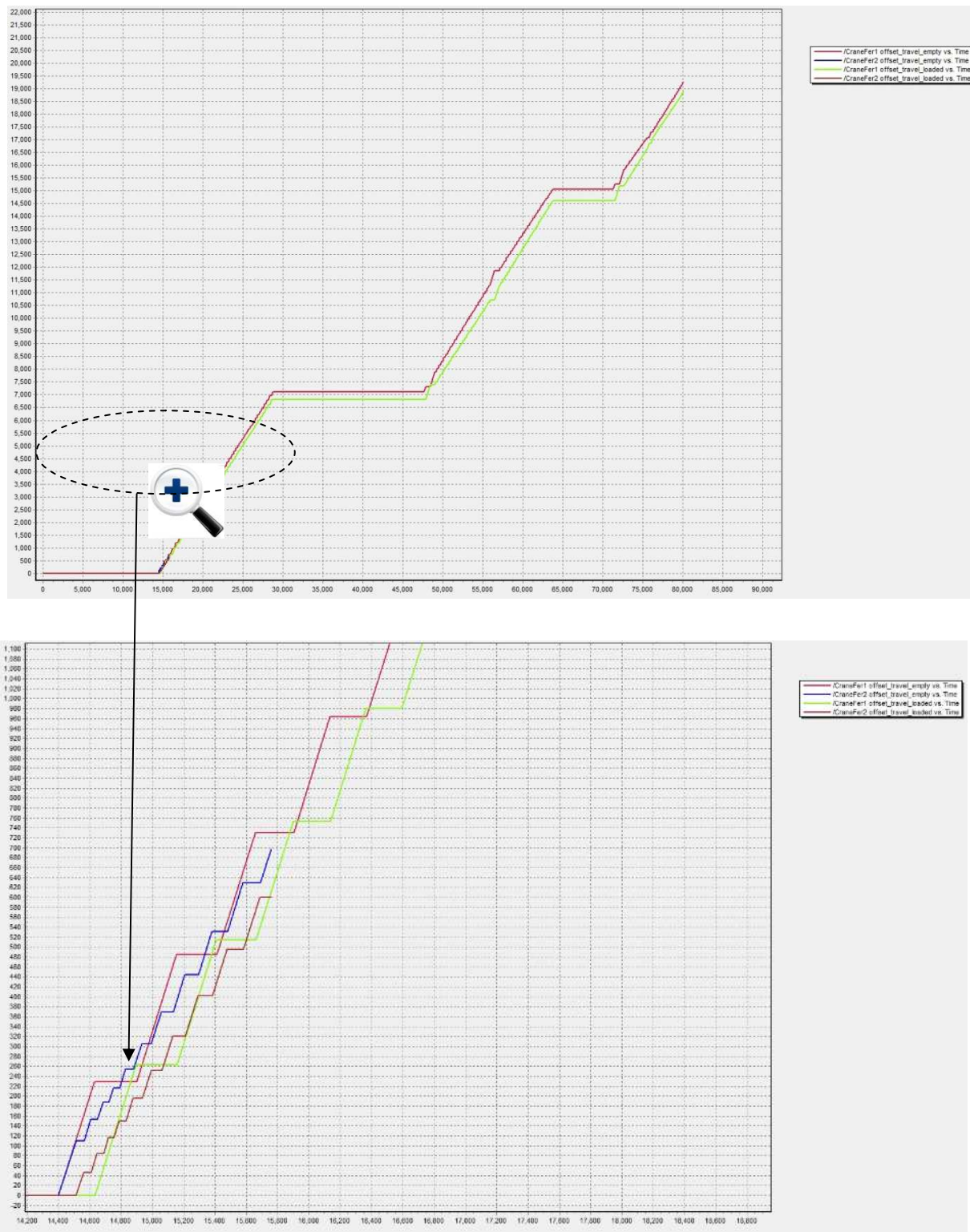


Figure VI.17. Taux de déplacement des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 4-2-4

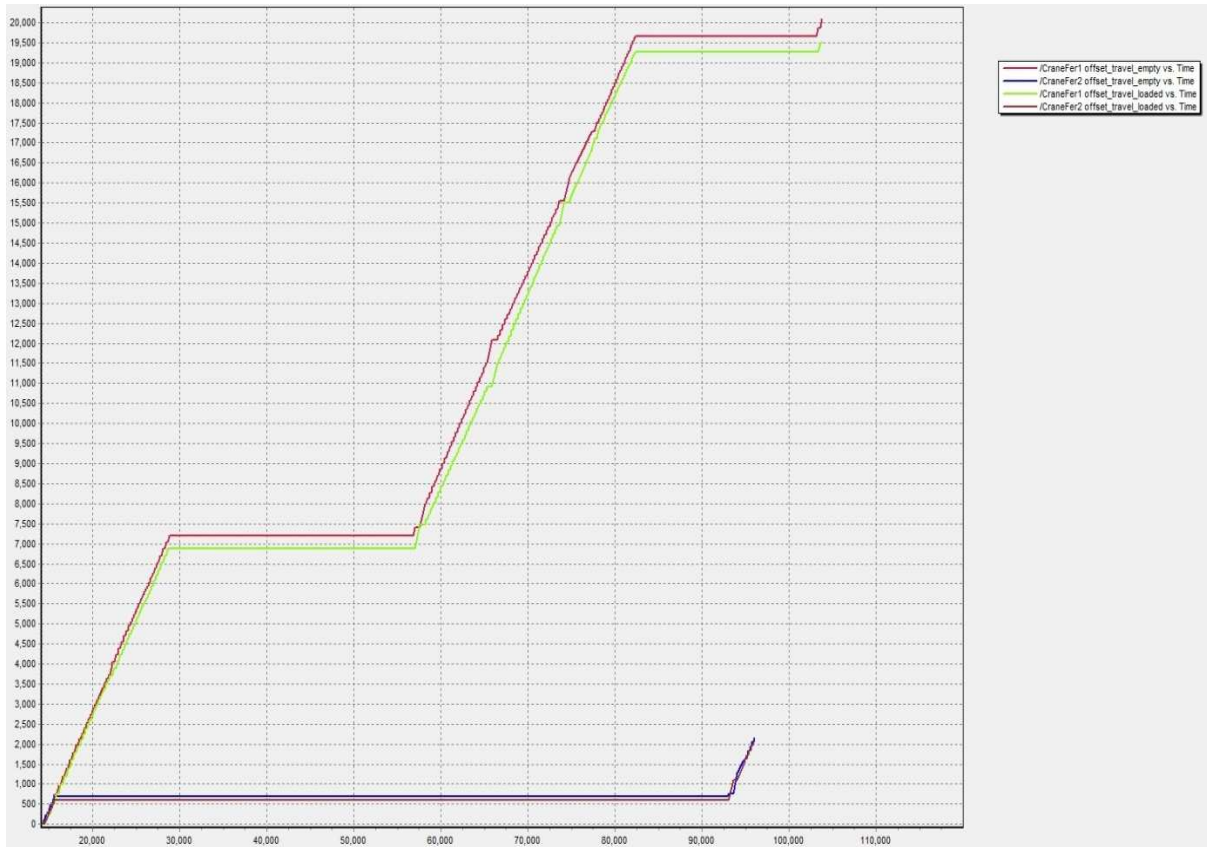


Figure VI.18. Taux de déplacement des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal pour le scénario 5-2-5

Les figures VI.13 et VI.14 indiquent que tous les conteneurs ont été transférés en fin de journée et que dans les zones de stockages temporaires (buffers), il y a zéro conteneur à la fin de la journée simulée.

Les figures VI.15 et VI.16 montrent le taux d'utilisation des deux portiques ferroviaires du terminal multimodal. Nous avons constaté qu'il y a un déséquilibre de charge de travail dans les deux scénarios; en effet, le portique ferroviaire "crane 1" avait une grande charge de travail par rapport au portique ferroviaire "crane 2". Il serait donc nécessaire d'étudier ce problème d'équilibrage de charge pour mieux optimiser les opérations de (dé) chargement au niveau de la cour ferroviaire.

Les figures VI.17 et VI.18 représentent les variables suivantes :

- offset travelempty : pour exprimer le taux de déplacement du portique ferroviaire sans prendre un conteneur ;

- offset travelloaded : pour exprimer le taux de déplacement du portique ferroviaire avec conteneur.

Ces deux figures concernent les portiques ferroviaires du terminal multimodal et montrent qu'ils ont été utilisés d'une manière optimale dans le scénario 5-2-5 par rapport au scénario 4-2-4. Ceci montre qu'il y a moins de mouvements improductifs dans le deuxième scénario

Pour tester l'effet de notre contribution d'évaluation de la performance sur le modèle de simulation, nous avons eu recours à la variable d'action "Maximiser le remplissage des navettes en desservant les terminaux voisins " afin d'améliorer l'indicateur de performance "Taux d'occupation des ressources ".

Nous constatons que l'application de la variable d'action telle qu'elle est définie a amélioré le modèle de simulation par rapport à l'évacuation rapide des conteneurs. Toutefois le modèle n'a pas respecté la contrainte concernant l'interdiction de faire entrer et sortir des conteneurs non destinés à un terminal. Par ailleurs, le diagramme de séquence associé à ce cas d'utilisation permet d'éviter cette erreur et de vérifier d'autres contraintes essentielles au bon fonctionnement et au respect de la réalité. En outre, le diagramme de séquence permet de déterminer qui fait quoi dans le modèle et permet d'éviter les différents conflits entre les variables d'action contradictoires.

6. VALIDATION DU MODÈLE

Selon [Bielli et al, 2006] l'objectif principal du processus de validation est de s'assurer que les hypothèses et la modélisation du système réel sont raisonnables et correctement mises en œuvre. D'après les résultats numériques obtenus et en comparant les entrées de notre modèle de simulation avec les sorties en terme de nombre de conteneurs, nous avons constaté que tous les conteneurs sont transférés comme prévu. Ensuite pour comparer le temps de manutention de conteneurs avec la moyenne réelle (3 minutes par conteneur), nous avons effectué un test Student sur un échantillon issu de 30 tests des deux modes que nous avons simulés. L'objectif est de déterminer si la moyenne de notre population est significativement différente de la moyenne réelle avec un risque α de 5%. La moyenne de notre population est égale à 3.31 minutes par conteneur.

1- Avec une hypothèse $H_0 = 3.5$ min par conteneur et un test unilatéral :

Nous savons que la moyenne de notre échantillon est inférieure à l'hypothèse H_0 , donc nous avons sélectionné l'hypothèse alternative suivante : Moyenne $1 <$ Moyenne théorique. Les

résultats de ce t-test montrent qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 avec le risque d'erreur $\alpha = 5\%$.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est de 14,51%.

2- Avec une hypothèse $H_0 = 3$ min par conteneur et un test unilatéral :

Pour ce cas, la moyenne de notre échantillon est supérieure à l'hypothèse H_0 , donc nous avons sélectionné l'hypothèse alternative suivante : Moyenne $1 >$ Moyenne théorique. Les résultats de ce t-test montrent qu'on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 avec le risque d'erreur $\alpha = 5\%$.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 3.53%.

L'exactitude et la cohérence des résultats de simulation ont été vérifiées par les différents tests Student effectués sur notre modèle. Les résultats testés sont plus proches des valeurs réelles.

7. CONCLUSION

Le travail présenté dans ce chapitre s'inscrit dans la dernière phase de notre contribution d'évaluation de la performance de la chaîne portuaire. Trois modes de transfert de conteneurs ont été simulés et comparés par rapport à la minimisation des retards, des coûts et des émissions de CO_2 .

Le problème a été décomposé et le terminal Atlantique est pris en considération dans un premier temps. Il s'agit de transférer les conteneurs entre le terminal Multimodal et les terminaux maritimes du port du Havre. Le but principal de notre simulation est de gérer le flux de conteneurs transférés entre le terminal multimodal et le terminal maritime Atlantique en respectant les dates de livraison et en minimisant les coûts des ressources utilisées. Deux règles de gestion ont été envisagées pour mesurer la pertinence de l'ordonnancement : mode de transfert massifié et mode de transfert planifié. La simulation des deux modes a montré que le mode planifié permet d'avoir un meilleur taux de service car le nombre de conteneurs transférés en retard est égal à zéro. Il est également meilleur par rapport à l'indicateur pourcentage de CO_2 généré par les engins de manutention. Par contre le mode massifié est meilleur économiquement car il permet de transférer les conteneurs en utilisant moins de ressources (locomotives, wagons) qui sont très coûteuses.

Ensuite, pour le troisième mode de transfert optimisé, nous avons réalisé un couplage de l'optimisation et la simulation afin de fixer par l'optimisation les variables de décision qui

alimentent l'outil de simulation. Le principe de cette démarche est, d'une part, d'identifier les variables de décision de la simulation par l'optimisation et d'autre part, d'évaluer leur performance par simulation.

Après avoir évalué ces différents modes de transfert, nous avons retenu le mode de transfert optimisé dont le principe est de respecter le schéma de circulation en Noria. Ce mode a été par la suite appliqué à l'ensemble des terminaux maritimes du port du Havre pour la prise en compte de la multimodalité au niveau de l'interface terrestre. Il s'agit de gérer la livraison et la réception des conteneurs par trains de fret (grandes lignes) et par barges.

CHAPITRE VII : CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Nous nous sommes intéressés à développer une démarche permettant de modéliser, simuler et évaluer la performance des processus de la chaîne portuaire et plus particulièrement ceux du terminal multimodal du port du Havre, afin d'obtenir des modes performants de transfert de conteneurs au regard des indicateurs de performance que nous avons définis. La mesure des indicateurs de performance, à savoir le taux d'occupation des ressources, le taux de service en fonction du nombre de conteneurs livrés à temps et le nombre de mouvements improductifs ainsi que l'évaluation de la performance sont réalisées par simulation des différents modes de transfert.

Nous avons proposé une démarche d'aide à la détermination d'indicateurs de performance dénommée ECOGRAISIM. Elle combine la méthode ECOGRAI et la simulation afin de déterminer et de mesurer les indicateurs de performance. ECOGRAISIM consiste à appliquer les quatre premières étapes de la méthode ECOGRAI, afin de déterminer les indicateurs de performance qui seront mesurés par la simulation. La première étape consiste à établir la grille GRAI. Dans la deuxième étape nous définissons les objectifs concernant les centres de décision et nous identifions les variables de décision dans la troisième étape. Enfin dans la quatrième étape, nous obtenons les indicateurs de performance. Une fois la liste des indicateurs établie, la phase suivante consiste à modéliser le système, afin de simuler son comportement. Une autre contribution de la thèse est le couplage de l'optimisation et de la simulation afin de déterminer les variables de décision de la simulation.

Sur l'aspect pratique, notre problème consiste à élaborer des tournées de navettes ferroviaires, afin de transférer les conteneurs destinés à l'export et/ou l'import. Il s'agit de dimensionner le nombre de ressources (locomotives, coupons) et de déterminer une planification d'exploitation. Une modélisation UML de la chaîne portuaire a été réalisée et a permis d'identifier deux catégories d'objets : les objets fonctionnels ou structurels et les objets de coordination ou de gestion. Par ailleurs, un système de simulation a été développé et trois modes de transfert de conteneurs ont été comparés : le mode massifié, le mode planifié et le mode optimisé. La comparaison des trois modes nous a permis de retenir le mode de transfert optimisé, dont le principe est de respecter le schéma de circulation en Noria. Ce mode a été, par la suite, appliqué à l'ensemble des terminaux maritimes du port du Havre pour la prise en compte de la multimodalité au niveau de l'interface terrestre.

D'autres questions méritent un traitement plus approfondi et nous conduisent à proposer quelques perspectives de recherche :

- Pour la continuité de nos travaux sur le problème de transfert de conteneurs, nous proposons d'enrichir notre simulation avec plus d'heuristiques et de métaheuristiques en vue d'effectuer d'autres couplages optimisation/Simulation. Il serait intéressant d'optimiser le déplacement des différents engins de manutention au sein du terminal multimodal, afin de réduire les mouvements improductifs et les temps d'attente. Il est également envisageable de développer d'autres modes de transfert de conteneurs sur la base d'une hybridation entre les modes massifié/planifié.
- Une autre piste de recherche très importante est d'envisager de simuler les différents modes de transfert des conteneurs, développés, en prenant en compte l'incertitude et les différents aléas qui peuvent se produire. Il serait intéressant d'appliquer le modèle de simulation pour étudier d'autres problèmes tels que le problème d'allocation des postes à quai au niveau de la cour fluviale du terminal multimodal ;
- Afin d'améliorer la performance globale du nouveau schéma logistique du port du Havre, nous proposons d'étendre l'étude de la performance à tous les centres de décision GRAI, afin de développer un tableau de bord complet permettant un pilotage par la performance du terminal multimodal. Cette mise en œuvre permettra la définition des systèmes d'indicateurs de performance pour l'ensemble des fonctions de la chaîne logistique.

Bibliographie

[Agence Paris Centre Normandie, 2011] Agence Paris Centre Normandie.
« Site web consulté le : 15/08/2015 ». <http://www.haropaports.com/sites/haropa/files/u30/multimodal55pages.pdf>, 2011.

[Almeder et al, 2009] Almeder, C., Margaretha Preusser, M., Hartl R. F. « *Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches?* *OR Spectrum* 31:95–119 », 2009.

[Andrei, 2013] Andrei B. « *The big book of simulation modeling : multimethod modeling with anylogic 6* ». Livre. Anylogic, 2013.

[Armando et Stefano, 2012] Armando, C., Stefano, d.L. « *Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach* », *Simulation Modelling Practice and Theory*. vol 21, n° 1, February 2012, pp 123–145, 2012.

[Babai, 2005] Babai, M.Z. « *Politiques de pilotage de flux dans les chaînes logistiques : impact de l'utilisation des prévisions sur la gestion des stocks* ». Thèse de doctorat délivré par l'École Central Paris, 2005.

[Beamon et Chen, 2001] Beamon B.M. et Chen V.C.P. « *Performance analysis of conjoined supply chains* ». *International Journal of Production Research*. Vol.15, p.3195–3218, 2001.

[Beaudry]Beaudry, M. « *Indicateurs de performance et tableau de bord. Courses*, » <http://video.coursgratuits.net/5/p-strategie-indicateurs-de-performance.php>

[Benghalia et al, 2012] Benghalia A, Boukachour J, Boudebous D. « *Simulation of the passage of containers through le havre seaport* ». The 14th International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, September 19-21 2012, Vienna, Austria.

[Benghalia et al, 2013] Benghalia A, Boukachour J, Boudebous D. « *Évaluation de la performance du trafic des conteneurs maritimes* ». 9th International Conference on Integrated Design and Production, CPI 2013 – Tlemcen, Algeria, October 21 - 23, 2013.

[Benghalia et al, 2014]Benghalia, A., Oudani, M., Boukachour, J., Boudebous, D., & Alaoui, A. E. « *Optimization-Simulation for Maritime Containers Transfer* ». *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, 5(2), 50-61. doi:10.4018/ijal.2014040104, 2014.

[Benghalia et al, 2014a]Benghalia A, Boukachour J, Boudebous D, «*Modélisation et simulation du transfert massifié de conteneurs* ». The 2nd International IEEE conference on Logistics Operations Management (GOL'14), Rabat, Morocco ,June 5-7, 2014.

[Benghalia et al, 2014b]Benghalia A, Oudani M, Boukachour J, Boudebous D, El Hilali Alaoui A. «*Proposition d'une approche de couplage optimisation-simulation pour le*

transfert de conteneurs maritimes ». The 10th International conference on Modelling, Optimization and Simulation (MOSIM'14), Nancy, France , November 5-7, 2014.

[Berrah, 1997] Berrah L. « *Une approche d'évaluation de la performance industrielle : modèles d'indicateurs et techniques floues pour un pilotage réactif* », Thèse de doctorat délivrée par l'INPG, 1997.

[Berrah et al., 2000] Berrah L., Mauris G., Foulloy L., Haurat A. « *Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach* », Computers in Industry, N° 43, p. 221-225, 2000.

[Berrah, 2002] Berrah, L. « *L'indicateur de performance, Concepts et applications* ». Cépaduès-Editions, Toulouse, 2002.

[Better et Glover, 2008] Better, M., Glover, F. « *Simulation Optimization: Applications in risk management, International Journal of Information Technology & Decision Making* », Vol 7, No 4 571-587, 2008.

[Bish, 2003] Bish E.K. « *A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal* ». European Journal of Operational Research, 144 :83-107, 2003.

[Bielli et al, 2006] Bielli, M., Boulmakoul, A., Rida, M. « *Object oriented model for container terminal distributed simulation* », European Journal of Operational Research. vol 175, n° 3, pp 1731–1751, 2006.

[Bitton, 1990] Bitton M., « *ECOGRAI: Méthode de conception et d'implantation de systems de mesure de performance pour organizations industrielles* ». Thèse de doctorat délivrée par l'université Bordeaux1, 1990.

[Bonvoisin, 2011] Bonvoisin, F. « *Evaluation de la performance des blocs opératoires : du modèle aux indicateurs* », Thèse de doctorat délivrée par l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2011.

[Brinkmann, 2011] Brinkmann, B. « *Handbook of Terminal Planning, Operations Research/Computer Science Interfaces* ». Chapter 2. Series 49, DOI 10.1007/978-1-4419-8408-1_2, Springer Science, LLC 2011.

[Burlat et Boucher, 2003] Burlat P., Boucher X. « *Une utilisation de la théorie des sous-ensembles flous pour le calcul d'indicateurs de performance* », MOSIM, Toulouse, 2003.

[Carlo et al., 2013] Carlo, H. J., Vis, I. F. A., Roodbergen, K. J. « *Seaside operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions* ». Flexible Services and Manufacturing Journal. DOI 10.1007/s10696-013-9178-3, 2013.

[Chan, 2003] Chan F. T. S. « *Performance Measurement in a Supply Chain* », International Journal Advanced Manufacturing Technology, vol. 21, pp.534–548, 2003.

[Cheyroux, 2003] Cheyroux L. « *Sur l'évaluation de performances des chaînes logistiques* ». Thèse de doctorat délivré par l'université de Grenoble, 2003.

[Christos et al., 1998] Christos H. Papadimitriou, Kenneth Steiglitz « *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity* ». ISBN : 0486320138, 9780486320137. L,528 pages, 1998.

[Chu et Lee, 2006] Chu W.H.J., Lee C.C. « *Strategic information sharing in a supply chain* ». European Journal of Operational Research, 174 (3), pp. 1567-1579, 2006.

[CNRTL] Dernière consultation : 30 Juillet 2015. <http://www.cnrtl.fr/definition/performance>

[Cordeau et al, 2005] Cordeau, J-F., G. Laporte, P. Legato, et L. Moccia. «*Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem*». Transportation Science, Vol. 39, pp. 526-538, 2005.

[Cordeau et al, 2015] Cordeau, J-f., Legato, P., Mary Mazza, R., T, Roberto. «*Simulation-based optimization for housekeeping in a container transshipment terminal*», Computers & Operations Research, pp 81-95, 2014.

[Crainic et al, 2007] Crainic T. G., Kim K., Barnhart C., Laporte G. Intermodal transportation. «*Transportation, Volume 14, Handbooks in Operations Research and Management Science*» (North-Holland, Amsterdam) 467–537, 2007.

[Dhaens., 2005] Dhaenens C. «*Optimisation Combinatoire Multi-Objectif : Apport des méthodes coopératives et contribution à l'extraction de connaissances*». Thèse pour obtenir le grade de Habilitation à Diriger des Recherches de l'U.S.T.L, 2005.

[Dolgui et Proth., 2006] Alexandre Dolgui, Jean-Marie Proth «*Les systèmes de production modernes* », Hermès, Volume 1 : Conception, gestion et optimisation, 415 pages, ISBN 2-7462-1249-8 Volume 2 : Outils et corrigées d'exercices, 380 pages», ISBN 2-7462-1250-1, 2006.

[Doumeingts, 1984] Doumeingts G. «*La méthode GRAI*». Thèse d'Etat délivrée par l'université Bordeaux I, 1984.

[DREO et al., 2003] Johann DREO, Alain PETROWSKI, Patrick Siarry, Eric Taillard. «*Métaheuristiques pour l'optimisation difficile. EYROLLES, pp.356, 2003, Algorithmes* », 978-2-212-11368-6, 2003.

[Drogoul, 1993] Drogoul, A.«*De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agent* ». Thèse de doctorat délivrée par l'Université Paris VI, Paris, 1993.

[Ducq, 2007] Ducq Y. «*Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles*», Mémoire de HDR, Université Bordeaux1, 2007.

[Estampe, 2008] Estampe D., Michrafy M., Génin P. et Lamouri S. «*Modélisation statistique des performances stratégiques Supply chain, financières et commerciales Et leurs corrélation* » 7e Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation - MOSIM'08 - du31 mars au 2 avril 2008 – Paris- France.

[Ferber,1995] Ferber J., «*Les systèmes multi-agents vers une intelligence collective*». II A. Inter Editions, 1995.

[Firadi et Agouzoul, 2005] Firadi, H., Agouzoul, A. « *Management Par la performance au Ministère de l'Economie et des Finances : les réponses du contrôle de gestion* ». (Dernière consultation 30 Juillet 2015), <http://fr.scribd.com/doc/115636989/38464925-Rapport-Final>, 2005.

[Franco et al, 2007] Franco M, Kennerley M, Micheli P, Martinez V, Mason S, Marr B, Gray D, Neely A. « *Towards a definition of a business performance measurement system* ». International Journal of Operations and Production Management, 2007, Vol.27(8), pp.784-801, 2007.

[Frédouet et Le Mestre, 2005] Frédouet, C H. Le Mestre, P. « *La construction d'un outil de mesure de la performance des réseaux interorganisationnels : une étude des réseaux d'acteurs portuaires Finance Contrôle Stratégie* » Volume 8, n° 4, p. 5 – 32, 2005.

[Gabay et Gabay, 2008] Gabay, J., and Gabay, D. « *UML 2 Analyse et conception-Mise en oeuvre guidée avec études de cas: Mise en oeuvre guidée avec études de cas* ». Dunod, 2008.

[Gambardella et al, 2001] Gambardella, L. M., Mastrolilli, M., Rizzoli, A. E., Zaffalon, M. « *An optimization methodology for intermodal terminal management* ». Journal of Intelligent Manufacturing, 12 (5-6), 521- 534, 2001.

[Gaugris, 2008] Gaugris, A. « *Les indicateurs de performance. Atelier régional pour les pays africains sur la mise en œuvre des recommandations internationales sur les statistiques du commerce de distribution* », 2008.

[Greis et Kasarda, 1997] Greis N.P., Kasarda J.D. « *Entreprise Logistics in the information Era* ». California Management Review, 39(3), pp 55-78, 1997.

[Haropa, 2015] Site web consulté le : 15/08/2015. http://www.haropaports.com/sites/haropa/files/u31/2015-01-28_haropa_bilan_2014_et_perspectives_2015.pdf

[Hartmann, 2002] Hartmann, S. « *Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics* ». " University of Kiel, Germany., pp. 1-18, 2002.

[Hartmann, 2005] Hartmann, S. « *A general framework for scheduling equipment and manpower at container terminals* », Springer Berlin Heidelberg, pp. 207-230, 2005.

[Henesey et al, 2003a] Henesey, L., Notteboom, T., Davidsson, P. « *Agent-based simulation of stakeholders relations: An approach to sustainable port and terminal management* », presented at Proceedings of the International Association of Maritime Economists Annual Conference, (IAME 2003), Busan, Korea, 2003.

[Henesey et al, 2003b] Henesey, L., Wernstedt, F., Davidsson, P. « *Market-Driven Control in Container Terminal Management* », presented at Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT'03), Hamburg, Germany, 2003.

[Henesey, 2006] Henesey, L. « *Multi-agent systems container terminal management* ». Thèse de doctorat. Blekinge Institute of Technology, 2006.

[Henesey et al, 2006] Henesey, L., Davidsson, P., and Persson, J. A. «*Comparison and evaluation of two automated guided vehicle systems in the transshipment of containers at a container terminal*», Proceedings of the 5th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, Leiden, Netherlands, 54-64, 2006.

[Humez, 2008] Humez V. «*Proposition d'un outil d'aide à la décision pour la gestion des commandes en cas de pénurie : une approche par la performance* ». Thèse de doctorat délivrée par Université de Toulouse, 2008.

[Imai et al, 1997] Imai, A., Nagaiwa, K., and Tat, C-W. «*Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia*». Journal of Advanced Transportation. 31(1), p. 75–94, 1997.

[Imai et al, 2001] Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. «*The dynamic berth allocation problem for a container port*». Transportation Research Part B 35, 401-417, 2001.

[Imai et al, 2002] Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S., Sasaki, K. (2002). «*The Containership Loading Problem*». International Journal of Maritime Economics, vol. 2002, pp. 126-148, 2002.

[Imai et al, 2005] Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. «*Berth allocation with service priority*». Transportation Research Part B 37, 437-457, 2005.

[Imai et al, 2006] Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. «*Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks*». European Journal of Operational Research 171, 373-390, 2006.

[ISEMAR, 2002] «*Le principe de la standardisation* ». Site web consulté le : 15/08/2015. <http://www.isemar.asso.fr/fr/pdf/note-de-synthese-isemar-49.pdf>, 2002.

[Jacot, 1990] Jacot J.H. «*A propos de l'évaluation économique des systèmes intégrés de production* », ECOSIP, Economica, 1990.

[Kaplan et Norton, 2001] Kaplan R.S., Norton D.P. «*Transforming the balanced scorecard from performance measurement to strategic management: Part I* ». Accounting Horizons (March): 87–104, 2001.

[Kefi, 2008] Kefi Gazdar M. «*Optimisation Heuristique Distribuée du Problème de Stockage de Conteneurs dans un Port* ». Thèse de doctorat délivrée par L'école centrale de Lille. 2008.

[Kelvin] Kelvin, L. Dernière consultation : 30 Juillet 2015 «*Quotations*, » <http://zapato.pi.net/kelvin/quotes/>

[Kempe, 2012] Kempe, N. «*Design and Operation of Automated Container Storage Systems, Contributions to Management Science, Springer*», 2012.

[Khosnevis et Asef-Vaziri., 2000] Khosnevis, B., Asef-Vaziri, A. «*3D Virtual and physical simulation of automated container terminal and analysis of impact on land transportation*». Rapport de recherche, université de Californie du Sud, 2000.

[Kim et al, 2000] Kim K H, Park Y, M. et Ryu K. R. « *Deriving decision rules to locate export containers in container yards*». European Journal of Operational Research, 124 :89-101, 2000.

[Kia et al, 2002] Kia, M., Shayan, E., Ghotb, F. «*Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation*», Computers and Industrial Engineering, vol 42, n° 2-4, pp533-540, 2002.

[Kim et al, 2006] Kim, K. H., Jeon, S. M., Ryu, K. R. « *Deadlock prevention for automated guided vehicles in automated container terminals*», vol. 28, pp. 659-679. 2006.

[Kim et Kim, 2002] Kim, K. H., Kim, H.B. «*The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers*», Transportation Research Part B: Methodological, vol. 36, pp. 821-835, 2002.

[Kim et Moon, 2003] Kim, K H et Moon, K, C. «*Berth scheduling by simulated annealing*». Transportation Research Part B : Methodological, vol. 37, no. 6, pages 541– 560, 2003.

[Kim et Park, 2002] Kim, K. H., Park, K. T. « *A note on a dynamic space allocation method for outbound containers*». European Journal of Operational Research. Vol. 148, pp. 92-101, 2002.

[Kim et Park, 2004] Kim, K. H., Park, Y. M. « *A crane scheduling method for port container terminals*». European Journal of Operational Research 156, 752-768, 2004.

[Kim, 2008] Kap Hwan Kim. «*Operational Issues in Modern Container Terminals*». Intelligent Freight Transportation, pages 51–69,2008.

[La logistique en France, 2015]« *Rapport du comité scientifique présidé par Michel Savy* ». Site web consulté le : 15/08/2015. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/_Conference_logistique_Rapport_du_Comite_scientifique_V9_10032015_vFinale.pdf

[Lee et al, 2002] Lee, T.W., Park, N.K., Lee, D.W. «*Design of Simulation System for Port Resources Availability in Logistics Supply Chain*», presented at IAME 2002, Panama City, Panama, 2002.

[Lee et al, 2003] Lee, T., Park, N., Lee,D. «*A simulation study for the logistics planning of a container terminal in view of SCM–PB–Routledge*», Maritime Policy and Management: The Flagship Journal of International Shipping and Port Research, n°3, pp 243-254, 2003.

[Lee et al, 2006] Lee, L-H., Chew, E.-P., Tan, K-C., and Han, Y. «*An optimization model for storage yard management in transshipment hubs*», OR Spectrum 28(4). p. 539–561, 2006.

[Lee et al, 2008] Lee, D.H, Wang, H.Q., Miao, L. «*Quay Crane scheduling with non-interference constraints in port container terminal*». Transportation Research Part E 44, 124-135, 2008.

[Le Mestre 2004] Le Mestre, P. « *La performance des réseaux interorganisationnels : une étude des réseaux d'acteurs portuaires* ». Thèse de doctorat délivré par l'Université du Havre, 2004.

[Le Mestre 2006] Le Mestre, P. « *A la recherche d'une structuration de la performance des terminaux maritimes, maillons des chaînes logistiques*, » RIRL 2006, Sixth International Congress of Logistics Research, 2006.

[Le passage portuaire , 2013] « *Le passage portuaire : Approches interdisciplinaires des flux de marchandises transitant par les ports* ». Livre. ISBN 978-2-9545436-0-4, 2013.

[Lepori et al, 2012] Lepori E, Barth M, Damand D. « *Apports et limites du modèle SCOR en logistique d'entrepôt* », The 1st International IEEE conference on Logistics Operations Management (GOL'12), Le Havre, France, October 17-19, 2012.

[Lim, 2005] Lim, J-K., Kim, K-H., Yoshimoto, K., Lee, J-H, and Takahashi, T. « *A dispatching method for automated guided vehicles by using a bidding concept* ». In Container Terminals and Automated Transport Systems. Springer Berlin Heidelberg. p. 325-344, 2005.

[Lorino, 1996] Lorino, P. « *Le contrôle de gestion stratégique : la gestion par les activités* », Editions Dunod, 1996.

[Matthieu Laurus, 2004] Matthieu Laurus M, « *Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques* ». Thèse de doctorat délivrée par l'institut national polytechnique de Toulouse, 2004.

[Mejri H, 2012] « *Un système d'aide à la régulation d'un réseau de transport multimodal perturbé : réponse au problème de congestion* ». Thèse de doctorat délivré par l'École Centrale de Lille, 2012.

[Mentzer et al., 2001] Mentzer J.T, Dewitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., Zacharia Z.G. « *Defining the supplychain Management* ». Journal of Business logistics, 22(2), 2001.

[Merk et al, 2011] Merk, O., et al. « *Compétitivité des villes portuaires: Le cas de l'Axe Seine (Le Havre, Rouen, Paris, Caen) - France* », Éditions OCDE. <http://dx.doi.org/10.1787/5kg58xpjvvxt-fr>, 2011.

[Michel, 2009] Michel, S-R. « *Contribution à la définition d'un cadre générique pour la définition, l'implantation et l'exploitation de la performance : Application à la méthode ECOGRAI* ». Thèse de doctorat, délivrée par l'université Bordeaux 1, 2009.

[Ministère de l'équipement et Bearingpoint France, 2005] « *Etude @-fret. Définition et conditions de mise en œuvre de plates-formes logistiques électroniques communautaires pour la traçabilité du transport multimodal de fret. Plate-forme de suivi des pré- et post-acheminements portuaires des marchandises. Cahier des charges* », Editeur Ministère de l'équipement, 199P, 2005.

[Moccia et al, 2006] Moccia, L., Cordeau, J-F., Gaudioso, M., and Laporte, G. « *A branch and cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal* ». Naval Research Logistics, 53(1), p. 45-59, 2006.

[Monaco et Sammarra, 2007] Monaco F.M. et M. Sammarra. « *The Berth Allocation Problem : A Strong Formulation Solved by a Lagrangean Approach* ». Transportation Science, Vol. 41No. 2, pp. 265-280, 2007.

[Mouloua, 2007] Mouloua, Z., « *Ordonnancements coopératifs pour les chaînes logistiques* ». Thèse de Doctorat délivrée par l'Université de Nancy, 2007.

[Najib, 2014] Najib M. « *Gestion des risques liés au transport des matières dangereuses* ». Thèse de doctorat délivré par l'université du Havre et l'université Caddi Ayyad de Marrakech, 2014.

[Nam et al, 2002] Nam, K., Kwak, K., Yu, M. « *Simulation study of container terminal performance* », Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, n°3, pp 126 -132, 2002.

[Nidra, 2002] Site web consulté le 26/08/2015. <http://nidra.free.fr/htmlpages/ports.htm>

[Nishimura et al, 2005] Nishimura, E., Imai, A. Papadimitriou, S. « *Yard trailer routing at a maritime container terminal* ». Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review vol. 41, pp. 53-77, 2005.

[Normandie actu, 2013] Site web consulté le : 15/08/2015. http://www.normandie-actu.fr/un-projet-de-port-center-pour-valoriser-le-port-du-havre_52252/

[NormandieActu, 2015] Site web consulté le : 15/08/2015. http://www.normandie-actu.fr/le-plus-gros-porte-conteneurs-de-cma-cgm-sera-baptise-au-havre-en-mai-2015_119788/

[Pan, 2010] Pan S. « *Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport : application au cas de la grande distribution* ». Thèse de doctorat délivré par l'École nationale supérieure des mines de Paris, 2010.

[Persson et Araldi, 2009] Persson, F., and Araldi, M. « *The development of a dynamic supply chain analysis tool—Integration of SCOR and discrete event simulation* ». International Journal of Production Economics, n°2, p. 574-583, 2009.

[Petering, 2011]. Petering, M. E. H. « *Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals* ». Transportation Research Part E, 47, 85–103, 2011.

[Ravignon et al, 1998] Ravignon L, Bescos P-L, Joalland M, Le Bourgeois S, Malejac A, « *La méthode ABC/ABM : piloter efficacement une PME* », Editions d'Organisation, 1998.

[Renauld, 2008] Renauld R. «*Contribution au pilotage des organismes de formation Application aux établissements de l'enseignement supérieur*». Thèse de doctorat délivrée par l'université Paul Verlaine de METZ, 2008.

[Rizzo et al, 2011] Rizzo F, Barboni M, Faggion L, Azzalin G, Sironi M, «*improved security for commercial container transports using an innovative active RFID system*», journal of Network and Computer Applications, 2011.

[Sammara et al, 2007] Sammarra, M., Cordeau, J. F., Laporte, G., and Monaco, M. F. «*A tabu search heuristic for the quay crane scheduling problem*». Journal of Scheduling, 10(4-5), p. 327-336, 2007.

[SCC, 2010] «*Supply Chain Council*», http://cloud.ld.ttu.ee/idu0010/Portals/0/Harjutu_stunnid/SCOR10.pdf, 2010.

[Smata, 2013] Smata N. «*Contribution à la modelisation et à l'analyse de la chaîne logistique en utilisant les réseaux de petri*».Thèse de doctorat délivré par l'université du Havre, 2013.

[Steenken et al, 2004] Steenken, D., Voss, S. and Stahlbock, R. «*Container terminal operation and operations research a classification and literature review*», OR Spectrum 26: 3–49, 2004.

[Sun et al, 2011] Sun Z et al., MicroPort : «*A general simulation platform for seaport container terminals*, Adv. Eng. Informat». doi:10.1016/j.aei.2011.08.010, 2011.

[S one] Site web consulté le : 15/09/2015. http://www.lantenne.com/S-One-Soget-lance-une-nouvelle-generation-de-guichet-unique-portuaire_a23036.html

[Tan, 2001] Tan K.C. «*A framework of supply chain management literature* », European Journal of Purchasing & Supply Management, 7, pp. 39-48,2001.

[UNCTAD, 2012] UNCTAD Secretariat. «*Review of maritime transport 2012*». Site web consulté le : 15/08/2015. http://www.rif.mer.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_2012_CNCD_sur_le_transport_maritime_cle717abd.pdf, 2012.

[Ung, 2008] Ung,J.N., Masanobu,S. «*Simulation-based seismic loss estimation of seaport transportation system Reliability Engineering & System Safety*».Volume 94, Issue 3, March 2009, Pages 722–731, 2008.

[Ung et Masanobu, 2009] Ung, J.N., Masanobu S., «*Simulation-based seismic loss estimation of seaport transportation system Reliability Engineering & System Safety*», Elsevier, vol 94, n°3, pp 722–731, 2009.

[Vernadat, 1999] Vernadat F. «*Techniques de modélisation en entreprise : application aux processus opérationnels* ». Editions Economica, 1999.

[Vincent, 2005] Vincent R, M. «*Evaluation de la performance des systèmes de conception pour la conduite de l'ingénierie des produits ; prototype logiciel d'aide aux acteurs*». Thèse de doctorat délivrée par l'universite Bordeaux 1, 2005.

[Vis et al, 2005] Vis, I. F. A., de Koster, R., Savelsbergh, M. W. P. « *Minimum vehicle fleet size under time window constraints at a container terminal* ». Transportation Science 39, 249-260, 2005.

[Vis et de Koster, 2003] Vis, I. F. A., de Koster, R. « *Transshipment of containers at a container terminal : An overview* ». European journal of operational research, vol. 147, n 1, pages 1–16, 2003.

[Voyer, 2006] Voyer, P. « *Tableaux de bord de gestion et indicateurs de performance* ». n°2, Presses de l'Université du Québec, 2006.

[Wilson et Roach, 2000] Wilson I. D. et Roach P.A. « *Container stowage planning : a methodology for generating computerised solutions* ». Journal of the Operational Research Society, 51 :1248-1255, 2000.

[Won et Yon, 1999] Won, Y.Y., Yong, S.C. « *A simulation model for container-terminal operation analysis using an object-oriented approach* », International Journal of Production Economics. vol 59, pp 221–230, 1999.

[Xiaojun, 1994] Xiaojun Y. « *Modélisation et Simulation des Systèmes de Production: une Approche Orientée-Objets* ». Thèse de doctorat délivrée par l'institut national des sciences appliquées de lyon, 1994.

[Yuh et Yuh, 2007] Yuh, Jen-C., Yuh, Min-C. « *An XML-based modular system analysis and design for supply chain simulation* », Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol 25, n°2, pp 289-302, 2007.

[ZEHENDNER, 2011] Zehendner, E., Absi, N., Dauzère-Pérès, S., Feillet, D. « *Affectation optimisée des ressources de déchargement/chargement et de transport dans un terminal à conteneurs multimodal* », 12ème congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Saint-Etienne, 2011.

[ZEHENDNER, 2013] « *Gestion des opérations dans les terminaux à conteneurs à l'aide de technologies de l'information avancées* ». Thèse de doctorat délivré par l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2013.

[Zeng et Yang, 2009] Zeng, Q., Yang, Z. « *Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals* », Computers & Operations Research, n°6, pp 1935-1944, 2009.

[Zhang et al, 2003] Zhang C, Liu J, Wan Y W, Murty K G & Linn R J. « *Storage space allocation in container terminals* ». Transportation Research Part B : Methodological, vol. 37, no. 10, pages 883–903, 2003.

[Zhao et Xie, 2002] Zhao X., Xie J. « *Forecasting errors and the value of information sharing in a supply chain* ». International Journal of Production Research, 40(2), pp. 311-335, 2002.

[Zouggar, 2009] Amrani-Zouggar A. « *Impact des contrats d'approvisionnement sur la performance de la chaîne logistique : Modélisation et simulation* ». Thèse de doctorat délivré par l'université Bordeaux 1, 2009.

Abderaouf BENGHALIA

Modélisation et évaluation de la performance des terminaux portuaires

Résumé

De nos jours, le transport maritime, en pleine évolution, joue un rôle très important dans le monde économique. Face à ce contexte, les différents maillons des chaînes logistiques portuaires sont tenus à améliorer continuellement leur performance pour rester compétitifs.

Dans cette thèse, nous proposons une approche, appelée ECOGRAISIM, pour l'évaluation de la performance d'une chaîne logistique portuaire. Elle combine la méthode ECOGRAI et la simulation afin de déterminer et de mesurer les indicateurs de performance. L'originalité dans ce travail est que l'approche ECOGRAISIM offre une étape supplémentaire qui consiste à montrer efficacement comment peut-on agir sur le système à évaluer. Dans notre démarche ECOGRASIM, nous nous intéressons à la phase concernant les variables d'action et nous proposons une nouvelle étape pour réaliser le pilotage par la performance.

Nos travaux de recherche concernent tout particulièrement le terminal multimodal du port du Havre. Nous nous focalisons sur les processus de manutention et de transfert massifié des conteneurs par navettes ferroviaires. Le but est d'obtenir un mode d'exploitation performant du terminal multimodal en comparant les différents scénarios de transfert des conteneurs par rapport à la minimisation des retards, des coûts et des émissions de CO₂.

Abstract

Nowadays, maritime transport, in full evolution, plays a very important role in the economic world. Against this background, the different seaport supply chains entities must improve continuously their performance to remain competitive.

In this thesis, we propose an approach called ECOGRAISIM for evaluating the performance of seaport supply chain. It combines ECOGRAI method and simulation to identify and to measure performance indicators. The originality of the ECOGRAISIM approach is to provide an additional step to show how to act on the system to be evaluated. In this approach, we focus on action variables and we propose a new step to achieve the performance control.

Our research works concern the multimodal terminal of Le Havre seaport. We focus on the processes of handling and massified transfer of containers by rail shuttles. The goal is to obtain an efficient operating process for the multimodal terminal by comparing different scenarios of containers transfer according to the minimization of delays, costs and CO₂ emissions.